

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA**  
**Hornicko-geologická fakulta**  
Institut environmentálního inženýrství

**Vliv aditiva na charakteristiku produktu po spoluspalování  
biomasy**

**Effect of additive on the characteristics of combustion products  
after biomass co-combustion**

diplomová práce

**Autor:**  
**Vedoucí diplomové práce:**

Bc. Veronika Olejárová  
Ing. Jaroslav Závada, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Hornicko-geologická fakulta  
Institut environmentálního inženýrství

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Veronika Olejárová**

Studijní program:

N2102 Nerostné suroviny

Studijní obor:

3904T029 Minerální biotechnologie

Téma:

Vliv aditiva na charakteristiku produktů po spoluspalování biomasy  
Effect of additive on the characteristics of combustion products after  
biomass co-combustion

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. úvod
2. charakteristika produktů po spalování
3. experimentální část
4. vyhodnocení analýz
5. závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN ISO 540. Uhlí a koks – Stanovení tavitelnosti popela. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009

NOSKIEVIČ, P. Spalování uhlí. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0204-X.

VILIMEC, L. Stavba kotlů II. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 151 s. ISBN 978-80-248-1716-3.

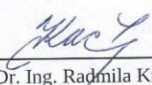
DEGEREJI, M.U., INGHAM, D.B, POURKASHANIAN, M., WILLIAMS, A., Numerical assessment of coals/blends slagging potential in pulverized coal boilers, Fuel, Volume 102, December 2012, Pages 345-353, ISSN 0016-2361.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Závada, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2014

Datum odevzdání: 30.04.2015

  
doc. Dr. Ing. Radmila Kučerová  
vedoucí institutu

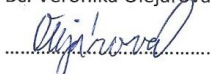


  
prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.  
děkan fakulty

### Prohlášení

- Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě dne  
30.4.2015

Bc. Veronika Olejárová  


## **Poděkování**

V úvodu bych chtěla velmi poděkovat svému otci, Jiřímu Olejárovi, který mi zprostředkoval a tudíž umožnil vykonat praxi v OJ Teplárny Teplárna Vítkovice, kde jsem měla možnost provést základní analýzy vzorků. Dále děkuji panu řediteli Jiřímu Bujnochovi, který s mou praxí souhlasil a také panu Jaroslavu Majerovi, který v provozu vše pro mou práci zařídil. Velké díky samozřejmě patří zaměstnancům, kteří mě provedli všemi pracovišti podniku a byli mi nápomocni při práci. Největší poděkování však patří panu Ing. Jaroslavu Závadovi, Ph.D., který mě v průběhu mé diplomové práce vedl, byl mi oporou a v problémových situacích poskytl pomoc a řešení. Nakonec chci poděkovat paní doc. Dr. Ing. Radmile Kučerové za ochotu a spolupráci.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá vlivem aditiva na spalování uhlí a spoluspalování uhlí s přídavkem biomasy. Práci jsem nejprve analyzovala základní parametry zkoumaného vzorku uhlí a jeho směsi s biomasou, konkrétně obsah hrubé vody ve vzorku, obsah analytické vody, celkový obsah vody, popelnatost, spalné teplo a výhřevnost. Dále jsem na základě výsledků chemických analýz daných vzorků charakterizovala vliv aditiva Nalco na chemismus produktu po spalování – popele. Z výsledků analýz byly stanoveny indexy struskování a zanášení, které jsou důležité pro optimální hospodaření s kotlem.

**Klíčová slova:** aditivum, uhlí, spoluspalování biomasy, produkty po spalování

## **Annotation**

This thesis examines the influence of additives on coal and coal co-combustion biomass with added. Work, I first analyzed the basic parameters of the sample of coal and biomass mixtures, namely gross water content in the sample water content analysis, the total water content, ash content, calorific value. I also based on the results of chemical analyzes of the samples characterized the effect of additives on Nalco chemistry of combustion products - ash. The analyzes were determined indices slagging and fouling, which are important for optimal management of the boiler.

**Key words:** aditive, coal, co-combustion biomass, combustion products

## Obsah

1.	ÚVOD DIPLOMOVÉ PRÁCE .....	9
2.	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE .....	10
3.	TEORETICKÁ ČÁST .....	11
3.1.	Uhlí .....	11
3.1.1.	Vznik uhlí .....	12
3.1.2.	Využití uhlí v energetice .....	12
3.1.3.	Typy uhlí .....	13
3.2.	Produkty po spalování .....	13
3.3.	Biomasa .....	15
3.3.1.	Vznik biomasy .....	15
3.3.2.	Biomasa pro energetické účely .....	15
3.3.3.	Spalování biomasy .....	16
3.3.4.	Spalování slámy .....	18
3.3.5.	Spoluspalování pšeničné slámy a uhlí .....	19
3.4.	Palivová aditiva .....	23
3.4.1.	Nalco .....	27
3.5.	Index drobivosti, charakteristika strusky .....	27
3.6.	Základní indexy pro zhodnocení tvorby strusky a zanášení .....	29
3.7.	Stanovení základních parametrů uhlí .....	32
4.	PRAKTICKÁ ČÁST .....	42
4.1.	Úprava vzorků a získání analytického vzorku .....	42
4.2.	Metodika analýzy .....	43
5.	VYHODNOCENÍ ANALÝZ .....	46
5.1.	Vyhodnocení analýz základních parametrů vzorků .....	46
5.2.	Srovnání základních analýz jednotlivých vzorků: .....	51
5.3.	Vyhodnocení analýz změny chemismu popela .....	52
6.	ZÁVĚR .....	58

## Seznam použitých zkratk

OJ – Organizační jednotka

RTG – Rentgen

$W_{ex}^r$  – Hrubá voda

$W^a$  – Voda v analytickém vzorku

$W_t^r$  – Celkový obsah vody

$A^a$  – Obsah popela v %

$H_t^r$  – Vodík v %

$Q_s^a$  – Spalné teplo

$Q_i^r$  - Výhřevnost

$Q_s^r$  – Spalné teplo v původním vzorku



## 1. ÚVOD DIPLOMOVÉ PRÁCE

Rozhodla jsem se zabývat tematikou biomasy a jejího spalování, protože mě velmi zajímá a chtěla jsem se o ní dozvědět co nejvíce. V této souvislosti jsem narazila na problematiku spojitosti s aditivu, která mě zaujala a chtěla jsem tedy prozkoumat tuto oblast důkladněji. Myslím, že v současné době je spalování biomasy vážné téma a v souvislosti s výhodami jejího použití se dostává čím dál tím více do popředí. Tato oblast však ještě není dokonale prostudovaná a zrealizovaná. Získané poznatky a výsledky analýz jsem shrnula v této diplomové práci. Při mé práci jsem se nejen důkladněji seznámila s jednotlivými stanoveními a s prací na moderních analytických přístrojích, ale především jsem mohla poznat, jak přídavek biomasy ovlivňuje základní parametry stanovení a jak použité aditivum mění chemismus vzorků s rozdílným obsahem biomasy. Jako chemismus chápeme obsah oxidů v popelu. Výsledky jsou pouze laboratorního charakteru, tudíž v reálném provozu se mohou tyto výsledky lišit. V posledních letech je velký posun od spalování čistých tuhých paliv ke spalování s biomasou, případně spalování čisté biomasy pro energetické účely. Většina kotlů v dnešní době využívá čistou dřevěnou fyto masu. Moderní technologie se však posouvají i k využívání jiných méně typických nekonvenčních alternativních paliv, jako jsou procesní vedlejší produkty, lokální odpady a zbytky ze zemědělských výrob. To by mělo za následek snížení ceny výrobních nákladů a snížení množství odpadů ukládaných na skládky.[45] Biomasa však má i spousty nevýhod, jako např. zvýšené struskování a zanášení v procesu spalování. Tyto problémy mohou částečně vyřešit použitá aditiva. V práci jsem se proto zaměřila na aditivum Nalco na bázi hořčíku a sledovala, jak dokáže toto struskování a zanášení při spalování ovlivnit.

## **2. CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Cílem diplomové práce je:

- Seznámení se s vlivem aditiv na problematiku spalování uhlí a spoluspalování uhlí s biomasou.
- Charakteristika základních parametrů analyzovaného vzorku uhlí a jeho směsi s biomasou.
- Sledování vlivu aditiva Nalco na charakteristiku popele po spoluspalování uhlí s biomasou.

### 3. TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části se zaměřím na popis jednotlivých surovin, produktů po spalování, postupů analýz a aditiv. Ze surovin jsem využila vzorku černého uhlí proplástku a peletek slámy jako biomasy. V první řadě jsem pojem uhlí definovala a popsala stručně jeho vznik. Existuje spousta druhů uhlí, proto jsem vyjmenovala základní rozdělení typů uhlí a využití tohoto paliva v energetice. A protože práce se týká zejména produktů po spalování, uvedla jsem také, o jaké produkty se jedná a co si pod nimi představit. Slovo biomasa je v dnešní době velmi oblíbený pojem, ale bylo důležité jej zmínit a uvést její vznik a také se zaměřit na proces jejího spalování a spoluspalování s uhlím. Jako palivové aditivum jsem použila Nalco. Toto aditivum je kapalného skupenství a bylo tedy snadné jej ke vzorkům aplikovat. Proces působení aditiv na uhlí a biomasu jsem v práci rozvedla a poukázala na problémy s tímto procesem spojené. V závěru teoretické části jsem popsala metody stanovení a postupy. Na obsah oxidů jsem stanovovala 6 vzorků a získala jsem protokol o obsahu základních oxidů po spálení. Pro základní analýzy jsem využila vzorky 3, kde nebylo třeba stanovení vzorků s Nalco.

#### 3.1. Uhlí

Z hlediska pojmu, můžeme uhlí definovat jako přirozeně se vyskytující, heterogenní, sedimentární organickou horninu vytvořenou geologickými procesy (teplota, tlak, čas) z částečně rozložené rostlinné hmoty v prvním stupni za aerobních podmínek, ve druhém stupni za podmínek anaerobních v přítomnosti vody, která se skládá z větší části z uhlíku a menší části anorganických látek. Největší využití kdekoli na světě uhlí nachází právě ve spalování jako zdroj tepla pro výrobu páry a výrobu elektřiny. Toto uhlí může být někdy nazýváno jako parní uhlí. Některé další typy uhlí se používají pro výrobu metalurgického koksu požadovaného pro výrobu železa z železné rudy. Uhlí může také sloužit jako pomocná surovina pro čištění, výrobu kapalných paliv jako je benzín a chemikálií. [3]

V dnešní době se zkoumají různé možnosti výroby energie v kontextu čtyř energetických imperativ. Není těžké odvodit, že kromě jaderné energie bude spalování uhlí, ropy a zemního plynu hlavní, dominantní způsob přeměny energie možná na další

desetiletí dopředu. Problémy jsou soustředěny kolem otázky, jak můžeme uspokojit poptávku po energii a zároveň minimalizovat nebo eliminovat CO<sub>2</sub> emise. [4]

### **3.1.1. Vznik uhlí**

Uhlí je unikátní typ kamene z geologického hlediska. Má široký sortiment chemických a fyzikálních vlastností a studie tohoto kamene probíhají již velmi dlouho. Toto množství studií má být hlavním vodítkem k pochopení druhů uhlí, jejich původ a techniky vyhodnocování uhelného výskytu. [5]

Jak jistě všichni víme, uhlí se vytvářelo po staletí v bažinatých ekosystémech jezerních pánví, říčních delt nebo nízko položených území blízko okrajů pevnin z těl pravěkých rostlin. Ty vytvářely uhlovodíky právě pomocí sluneční energie, vzduchu, vody a minerálních látek. Rozklad probíhal anaerobně, tedy za nepřístupu kyslíku, kdy odumřelá těla rostlin klesaly pod hladinu bažin. Zde se tedy nemohly rozložit běžnými způsoby. Svědčí o tom nemalé paleontologické nálezy. Hmota, která se podobá rašelině, se postupně nejprve dostávala do větších hloubek a díky zvyšujícím se tlakům a teplotám z ní byla vytěšňována voda a jiné látky, kdežto podíl uhlíku významně rostl. Největší a nejkvalitnější uhelné sloje pocházejí z období karbon (zde vznikalo i ostravsko – karvinské uhlí). [6]

### **3.1.2. Využití uhlí v energetice**

Mezi hlavní využití uhlí na světě patří výroba elektrické energie a výroba oceli. Další průmyslové využití a domácí spotřeba tvoří zbývající část.

Avšak nedostatek ekologických kontrol v provozu s uhlím v minulosti vedlo ke znečištění ovzduší i půdy, stejně tak i ke zničení krajiny. Moderní environmentální pokyny a legislativa se snaží napravovat poškození přírody způsobené v minulých letech a provést preventivní opatření proti opětovnému výskytu těchto problémů. [5]

Spalovací proces využívá reakce uhlíku s kyslíkem pro výrobu tepla. Spalování uhelné částice probíhá ve více stupních [7]:

1. Ohřev uhelné částice
2. Uvolnění prchavých látek
3. Spalování prchavých látek
4. Spalování polokoksu

### **3.1.3. Typy uhlí**

Existují tři typy uhlí, které se liší zejména stářím a hloubkou uložení. Všechny tři typy se nacházejí ve vrstvách a často jsou mezi různými druhy hornin, jako například pískovec a břidlice.

První stupeň formování uhlí nastal působením hmotnosti a tlaku na rašelinu za vzniku hnědého uhlí. Hnědé uhlí je měkčí a drobivější. Další stupeň je hlubší, tzv. živičné (bituminózní) uhlí. Název vznikl z latinského slova bitumen, což je druh dehtu, je mnohem tvrdší a sušší. Je to nejběžněji se vyskytující druh uhlí a nejčastěji využívané. Třetí je stupeň nejhlubšího a velmi černého, lesklého uhlí. Nazýváme jej antracit. Je to nejsušší uhlí a poskytuje nejvíce tepla. Další druhy uhlí se řadí dle množství uhlíku, který obsahují. Určité druhy hnědého uhlí obsahují jen 30% uhlíku, zatímco antracit může obsahovat až 98% uhlíku. [8]

## **3.2. Produkty po spalování**

Produkty po spalování jsou látky v tuhém skupenství, vznikající jako vedlejší produkty po spalování. [41] Patří zde struska (škvára) a popílek.

Struska vznikající v peci je velmi složitý jev závislý na chemickém a mineralogickém složení popílku a také na podmínkách v peci. (teplota, redukční nebo oxidační zóna atd.).[10]

Popílkem nazýváme anorganickou pevnou fází ve zplodinách, která vzniká při spalování pevných paliv v uhelných elektrárnách. Zachycujeme jej z kouřových plynů v odlučovačích. Vlastnosti popílku: Popílek je produkt elektrárenských odlučovačů. Dělíme

jej na hnědouhelný a černouhelný, podle druhu spalovaného uhlí. Disponuje velkou variabilitou chemického složení.[11]

Struskování popela v peci a zanášení popela a ukládání v konvenčních sekcích jsou hlavní operační otázky pro většinu práškových uhelných kotlů. Toto struskování a zanášení snižuje energetickou účinnost. [4]

Spalujeme-li palivo, které obsahuje popel, dochází vždy ke tvorbě nánosů. Podle způsobu vzniku rozlišujeme dva druhy [9]:

- Popílkové – na konvenčních plochách
- Struskové – usazeniny na stěnách ohniště a teplosměnných plochách

Struskové nánosy dělíme dále na:

- Slinuté nánosy – přímo: zachycování prachových částic v kapalném nebo plastickém stavu a jejich slepování s povrchovou glazurou na stěně; nepřímo: z nánosů původně jen stmelěného, slnutí dochází po zvýšení teploty
- Stmelené nánosy – tvrdé nánosy s vrstevnatou strukturou, vznikají chemickými přeměnami

Chemické a fyzikální složení popela je velmi důležité pro výsledné produkty spalování. V laboratorních podmínkách spalování paliva se popeloviny mění na popel, v provozu se mění na tzv. tuhé zbytky po spalování (struska, škvára) nebo jako nenatavené popelové částice a zbytek tvoří popílek unášený spalinami. Během procesu spalování mění popeloviny plynule své fyzikální a chemické vlastnosti a až v závěru tvoří roztavenou směs původních minerálů, různých eutektik a prvků. Při opětovném ochlazování směsi probíhá její tuhnutí (zvyšování viskozity) podle jiné závislosti než při zahřívání (tavení). Proto produkt po takovémto tepelném „zpracování“ mění své chemické i fyzikální vlastnosti proti původní hmotě.

Při vysokých teplotách chování popelovin (proces měknutí, tavení, tečení částice popela) charakterizují termoplastické vlastnosti popela. Na tyto vlastnosti má vliv poměr kyselých a zásaditých oxidů (výpočet indexů viz. kapitola: Základní indexy pro zhodnocení tvorby strusky a zanášení) pro hodnocení sklonu popela ke struskování. Další termoplastickou vlastností je viskozita tekuté strusky. Viskozita se určuje z obvyklého

rozsahu složení popela, kdy některé jeho složky ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) viskozitu zvyšují, zatímco jiné ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) viskozitu zvyšují.[9]

### **3.3. Biomasa**

Stále častěji se v dnešní době setkáváme se slovem biomasa ve spojení s ekologií nebo s obnovitelnými zdroji energie. Biomasa je vlastně veškerá organická hmota, která vzniká díky fotosyntéze, případně hmota živočišného původu. Jako biomasu často označujeme rostlinnou biomasu, která se využívá k energetickým účelům. Za obnovitelný zdroj energie se nemůže považovat biomasa přeměněná na fosilní paliva.

#### **3.3.1. Vznik biomasy**

Oxid uhličitý v atmosféře je spotřebováván rostlinami při fotosyntéze. Chlorofyl a energie slunečního záření pak oxid uhličitý přeměňují na glukózu a další organické sloučeniny. Konečný odpadní produkt je kyslík. Uvolněný kyslík včas nepochází z oxidu uhličitého, nýbrž z vody v rostlině.

Biomasu, která vznikla činností rostlin, můžeme popsat jako „energetickou konzervu“. V rostlinách je uchována část zachycené sluneční energie a my ji můžeme uvolnit a využívat pro další – naše účely.

#### **3.3.2. Biomasa pro energetické účely**

Tzv. energetické plodiny, takto nazýváme biomasu určenou pro energetické využití. Využití má každá rostlinná biomasa, ovšem pro energetické účely se hodí jen některá, se specifickými vlastnostmi.[12]

Rostlinná biomasa je tvořena řadou sloučenin, ze kterých má pro význam energetického využití zejména celulóza, škrob, lignin, oleje a pryskyřice.[42] Při spalování je velmi důležitý také obsah vody a obsah anorganických složek tvořících popel.

Taková biomasa by měla mít splňovat [12]:

- Přeměna CO<sub>2</sub> na biomasu pomocí sluneční energie by měla být vysoká (vysoká primární produkce);
- Vysoký obsah sušiny za sklizně (malý obsah vody);
- Vysoká výhřevnost, nízká popelnatost;
- Nenáročnost na příjem vody a živin;
- Odolnost proti nemocem a škůdcům.

Dřevo a dřevní odpad, biologicky rozložitelný komunální odpad, zemědělské plodiny a odpad z jejich zpracování, živočišné zbytky apod. patří k nejdůležitějším zdrojům biomasy. Více než 97% světové energie z obnovitelných zdrojů patří právě spalování biomasy. [13]

### **3.3.3. Spalování biomasy**

Spalování a pyrolýza biomasy jsou považovány za hlavní a přímé cesty, jak získávat energii z lignocelulosoových materiálů. Konstantní růst požadavků lidstva na energii v minulém století vyplýval z vysoké závislosti na fosilních palivech a to vyvolalo významné environmentální výzvy. V tomto ohledu se obnovitelné zdroje energie zdají být udržitelným nástrojem pro doplnění a postupné nahrazení fosilních paliv při výrobě energie. [14] Při vyčerpávání fosilních paliv a neustále rostoucím problémům s životním prostředím biomasa stále více přitahuje pozornost celého světa jakožto zelená energie z obnovitelných zdrojů energie. [15]

Biomasa představuje některé výhody jako je její neutralita vůči emisím CO<sub>2</sub> během svého životního cyklu, nízký obsah síry, což představuje nižší emise SO<sub>2</sub>. [14] Je považována za CO<sub>2</sub> neutrální především proto, protože spotřebuje stejné množství CO<sub>2</sub> při růstu jako při uvolňování při spalování [23] Mimo to je biomasa považována za autonomní (dostupný všude) zdroj, který částečně snižuje energetickou závislost na zahraničním trhu ve všech zemích. Vzhledem k výhodám zažívá biomasa pro výrobu energie obrovský zájem v posledních letech. [14]

Spalování biomasy je třetím největším využíváním energie na světě, hned po spalování uhlí a olejů. Využití biomasy může poskytnout náhradu paliv fosilních a



zmírnění celosvětového nedostatku energie. Biomasa je navíc šetrná k životnímu prostředí. Největším problémem však zůstává struskování, zanášení, koroze, zužitkování popela, jemné pevné částice apod. [23]

Nicméně i biomasa představuje určité nevýhody při využívání. Jako jedna z nejvýznamnějších je produkce pevných odpadů. Popel vznikající při spalování biomasy představuje variabilní kompozici s širokou škálou minerálních a anorganických složek. Ty mohou vycházet z rostlinné struktury jako takové nebo z jiných nečistot přidávaných během procesu nebo dopravě. Právě z těchto důvodů je třeba mít vyčerpávající informace o složení a charakteristice popele (jak složení tak i morfologie). [14] Množství popela ze spalování biomasy je průměrně 1-6%. Dřevo má relativně nízkou popelnatost – kolem 0,3-1%. Vyšší popelnatost má pak sláma (5%) nebo trávy (7%). Pro srovnání, černé uhlí může mít popelnatost mezi 10-13%. [13]

Technologie konverze biomasy lze rozdělit do tří skupin: přímé spalování, biochemická konverze a termochemická konverze. Jak už bylo psáno výše, zbytkový popel z biomasy se skládá z anorganických materiálů. Jejich složení závisí na typu biomasy, původu, typu půdy atd.

Tavení popele zvyšuje tendenci držet přenos tepla na povrchu a může mít za následek tvorbu strusky a depozic na topných plochách ve formě popílku. Tím je ovlivněna bezpečnost, spolehlivost a hospodárnost spalovacího zařízení. Tvorba strusky a znečištění může vést ke snížení účinnosti, využití a doby chodu zařízení a také vliv na produkty zplyňování biomasy. Při spalování spolu s uhlím může biomasa významně snížit teplotu tání popele a vliv na ukládání částic popele a přenos tepla na povrch. Struska a znečištění nejen snižují přenos tepla, ale také často způsobují korozi a erozi. To je hlavní problém, který způsobuje snížení životnosti zařízení a zvyšuje pravděpodobnost odstávky na údržbu a čištění.[15]

Vlastností biomasy, která negativně ovlivňuje spalování, je její zplyňování při teplotách 200°C a vyšších. Biomasa má tzv. velký podíl prchavé hořlaviny, kdy se při spalování vytváří dlouhý plamen a komplikuje to konstrukce topenišť na spalování biomasy. Další takovou vlastností je i obsah vody. Rostlinná biomasa obsahuje značné množství vody a po vysušení je hygroskopická. Uhlí po zvlhnutí či promočení nesnižuje svou výhřevnost, naopak biomasa tímto může ztratit až polovinu své výhřevnosti.[12]

Jak známe, popel z biomasy má relativně nízkou teplotu tavení v důsledku vysokého obsahu alkalických kovů, zejména draslíku a v menší míře sodíku. Draslík a sodík může významně snížit teplotu tavení popela a tím podporovat ukládání popela. Biomasa je bohatá na chlor v porovnání s uhlím, což hraje významnou roli při vzniku deposit. Všechn chlor z paliva se uvolní v rané fázi procesu spalování a mnoho z nich spojuje s dostupné alkálie se vznikem par alkalických chloridů. Páry alkalických chloridů budou kondenzovat na teplosměnných plochách v kotli, kde se část alkalických chloridů přemění na alkalické sírany, které tvoří počáteční vrstvy usazenin. [4]

Na celém světě je čím dál tím větší zájem o spalování uhlí a biomasy. Důvodem je snížení produkce  $\text{CO}_2$  a jak už bylo zmíněno, snížení závislosti na zahraničním trhu, což ale není problém ČR.[16,17,18]

### **3.3.4. Spalování slámy**

Spalování slámy se jeví jako výhodné, avšak s sebou nese spousty nevýhod, jako např. spékání biomasového popela (důsledkem je pak tvorba nápeků u hořáku). Toto spékání je způsobeno složením popela. Popel také způsobuje vznik skelných nebo skelně krystalických vrstev. Tyto vrstvy mají vysoký obsah oxidů  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  a  $\text{K}_2\text{O}$ , které snadno vytvářejí sklo, kde  $\text{SiO}_2$  je významný sklotvorný oxid; oxidy  $\text{CaO}$  a  $\text{K}_2\text{O}$  pak snižují viskozitu vzniklé sklotvorné taveniny.  $\text{P}_2\text{O}_5$  také vytváří sklo a zbývající oxidy jsou v křemičitém skle rozpustné a napomáhají jeho vzniku. Snímky skelné a skelně krystalické podoby můžeme vidět na obrázku 1. [23]

Popel ze slámy se skládá hlavně z oxidu křemičitého a draslíku a jejich teplota tání je nízká ( $1000^\circ\text{C}$  a nižší). Množství vápníku a fosforu je nižší než u dřeva, ale vyšší než v uhlí.[19]



*Obrázek 1: snímky skelné a skelně krystalické podoby [23]*

### 3.3.5. Spoluspalování pšeničné slámy a uhlí

Stébelniny jsou velmi rozšířené biopalivo, které však má i spousty nevýhod:

- vysoký podíl prchavé hořlaviny (až 80 % sušiny paliva)
- obtížné promíchávání spalných plynů se vzdušným kyslíkem
- popel se spéká při nízkých teplotách a tvoří sklovité nánosy v blízkosti plamence
- polétavý popílek s obsahem těžkých kovů - kotle vyšších výkonů nutno odprašovat
- koroze teplosměnných ploch při spalování stébelnin s obsahem chlóru[45,24]

Spoluspalování pšeničné slámy a uhlí je nízkonákladový, rozšířený a efektivní způsob jak naložit s energií z biomasy. Každopádně biomasa, především travní paliva, obsahují velké množství těkavých prvků, jako jsou K, Na, Cl, které způsobují při spalování řadu provozních problémů, patří zde: koroze, zanášení a tvorba strusky v průběhu spalování.[25]

Sláma jako taková má výhřevnost okolo 16 MJ/kg a 80% prchavé hořlaviny.

Tabulka 1 poukazuje na zásadní rozdíly mezi slámou a uhlím:

*Tabulka 1: Srovnání základních stanovení uhlí a slámy[27]*

	<b>UHLÍ</b>	<b>SLÁMA</b>
<b>Těkavé látky</b>	40,0 hm. %	72,0 hm. %
<b>Popel</b>	13,1 hm. %	4,5 hm. %
<b>Vlhkost</b>	9,0 hm. %	10,0 hm. %
<b>Spalitelné látky</b>	37,9 hm. %	13,5 hm. %
<b>Výhřevnost</b>	24,7 MJ/kg	15,0 MJ/kg

Sláma má významně vyšší obsah těkavých látek a také je začne uvolňovat daleko rychleji při nižších teplotách než uhlí. Tím se také mění zápalná teplota slámy. Je nutné proto při spoluspalování dbát na dobrý přívod vzduchu pro dostatek kyslíku pro rychlejší odpařování těkavých látek. Výhřevnost slámy je podstatně nižší než u uhlí a je jí třeba více aby byl zachován stejný výkon jako u uhlí.

Je známo, že biomasa produkuje více  $\text{NH}_3$  a menší koncentrace HCN.[26] Biomasa je považována za přírodní zdroj uhlíku a obvykle má menší obsah síry, dusíku a jiných znečišťujících látek na rozdíl od uhlí. Proto se využívá při spoluspalování s uhlím, pro snížení obsahu  $\text{NO}_x$  a dalších znečišťujících sloučenin. Sláma má ale vyšší obsah draslíku a chloru než uhlí.[27]

V energetice se nejčastěji využívá kombinace uhlí – pšeničná sláma. V následující tabulce 2 jsou uvedeny experimentální zjištění při spoluspalování pšeničné slámy a uhlí z Číny. Analýza se prováděla v muflové peci žháním při  $815^\circ\text{C}$ . Tepelný poměr uhlí a slámy byl 1,95:

Tabulka 2: Výsledky zákl. stanovení při spoluspalování pšeničné slámy a uhlí [27]

	Vlhkost	Těkavé látky	Popel	Pevný uhlík	Spalné teplo
Palivo	(hm.%)	(hm.%)	(hm.%)	(hm.%)	(MJ kg <sup>-1</sup> )
Uhlí	1,00	18,08	30,09	50,83	31,65
Sláma	8,06	70,54	4,93	16,47	16,26

Tabulka 2 ukazuje srovnání výsledků bližší analýzy pro všechny vzorky. Analýza ukázala, že obsah vlhkosti s nárůstem obsahu uhlí lineárně klesá. Avšak obsah těkavých látek, popela a pevného uhlíku nevykazovaly lineární vztah s obsahem uhlí. Zřejmě probíhaly některé kondenzační reakce, které obsahy těkavých látek, popela a pevného uhlíku ovlivnily. Nelineární vztah pro množství popela je analyzován pomocí tzv. D faktoru, který definuje poměr skutečně měřeného obsahu popela k teoreticky vypočtenému obsahu popela, viz. rovnice 1 (neberou se v potaz žádné interakce mezi uhlím a slámou při spalování) [27]:

$$D = \frac{A_{blend}}{A_{coal} \cdot x + A_{straw} \cdot (100 - x)} \quad (1)$$

Kde:

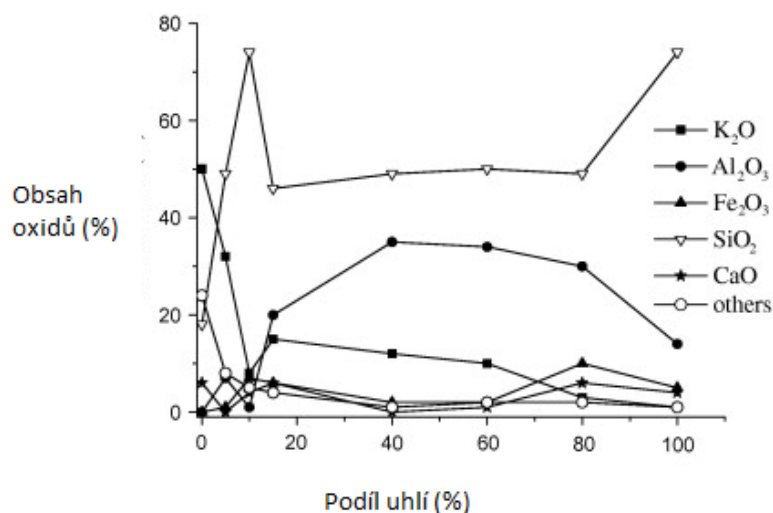
$A_{blend}$  je experimentálně změřený obsah popela v testované směsi

$A_{coal}$  je obsah popela v uhlí

$A_{straw}$  je obsah popela v slámě

$X$  je obsah uhlí ve směsi v hm. %

Teoretická analýza 11 (obrázek 2) vzorků směsí pšeničné slámy a uhlí (od 0 – 100 hm.%) pomocí rentgenové fluorescenční spektrometrie ukázala obsah jednotlivých oxidů v jednotlivých směsích vzorků s různým obsahem uhlí. Můžeme si všimnout, že při 5 – 15 hm.% obsahu uhlí prudce poklesne obsah  $K_2O$  a naopak prudce stoupne obsah  $SiO_2$ . Při 10% obsahu uhlí byl obsah  $K_2O$  nejnižší a obsah  $SiO_2$  nejvyšší. Obsah  $SiO_2$  při 20 – 80% hmotnostním obsahu uhlí zůstal stabilní. Obsah  $Al_2O_3$  postupně se zvyšujícím se obsahem uhlí roste. Přítomnost vysokých obsahů  $Al_2O_3$  a  $SiO_2$  podpořila závěry z měření fúzních teplot, kde se uvádí, že fúzní body popela jsou zvýšené, když se přidá uhlí ke slámě.[27]



Obrázek 2: Teoretická analýza 11 vzorků [27]

**Z analýzy spoluspalování biomasy a uhlí bylo tedy zjištěno:**

- Směs s obsahem uhlí od 5 – 15 hm. % má za následek sníženou tvorbu popela oproti čistému uhlí;
- Směs s obsahem uhlí od 20 – 90 hm. % má za následek zvýšenou produkci popela;
- Směs s obsahem uhlí 10 hm. % má nápadný inhibiční účinek tvorby popela a směs se 40 hm% uhlí naopak má nejvyšší produkci popela;

- Experimenty ukazují, že směsi s 5 – 15 hm. % uhlí produkují draslík, který je urychlen do plynných produktů ve fázi těkavých látek při teplotě 250 - 380°C a proto mají inhibiční účinek;
- Obsah  $K_2O$  v popelu směsi s 10 hm. % uhlí je nejnižší a obsahy minerálů s obsahem K jsou taktéž nejnižší;  
Obsah oxidů v popelu byl měřen RTG fluorescenční spektrometrií a obsah minerálů pomocí RTG práškové difraktometrie. [27]

### 3.4. Palivová aditiva

Aditiva se při spalování využívají, aby se minimalizovalo struskování a zanášení v kotli. Takováto minerální aditiva působí na principu zachycování látek, jako jsou soli alkalických kovů a kovů alkalických zemin.[28] Účelem přidávání aditiv je zvýšení teploty tavitelnosti, aby se vznik strusky a zanášení snížil. [20,21,22] Aditiva mohou reagovat s částicemi popele, pozměnit složky strusky, inhibují tvorbu kapalně fáze a mohou vytvářet ochrannou vrstvu na povrchu trubek. Nánosy mohou způsobovat pokles přenosu tepla nebo změny na vývodech kouřových plynů.[29] Přítomnost popele má negativní dopad na spalovací proces, protože se ztrácí energetická účinnost a zvyšují náklady na údržbu díky depozicím (struskování a zanášení), která způsobuje tepelný odpor ve výměnících tepla, korozi a zvýšení množství kouře a aerosolových emisí.[14] To může způsobovat značné produkční a energetické ztráty, nucené odstávky a především snížení životnosti kotle.[30] V posledních letech probíhá rozsáhlý výzkum a vývoj chemických přísad, které slouží k úpravě paliva pro odstranění problémů.[30]

Postupy pro zmírnění těchto problémů se řeší přidáním chemických látek, tzv. aditiv, spolužalováním s dalšími biopalivy nebo palivy, loužením alkalických sloučenin s vodou a kombinací různých termo-chemických procesů. Účelem přidávání aditiv je zvýšení teploty tavitelnosti, aby se vznik strusky a zanášení snížil. [20,21,22]

Například alkalické kovy jako jsou Na a K jsou nejčastěji spojovány se zanášením a aglomerací ve fluidním loži.[31] Síra, zásadotvorné prvky (Na, K), vanad a chlor patří mezi časté palivové nečistoty a hrají důležitou roli při vzniku kapalných depozit a považujeme je za hlavní zdroj koroze pecí. Tato kapalná fáze nejenže podporuje

hromadění částic popílku na plochách výměny tepla, ale také obsahuje elektrolyty, které elektrochemicky napadají kovové části. [32]

Aditiva slibují zmírnění těchto problémů a dokonce snížení emisí  $\text{SO}_2$  a  $\text{NO}_x$ . Bylo však prokázáno, že vápenec, dolomit a přísady obsahující  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nemají žádný vliv na snížení emisí  $\text{SO}_2$  ve fluidním kotli. [31] Přísady jsou hodnoceny podle obsažených reagujících sloučenin, jako jsou přísady na bázi hliníku, přísady na bázi síry, přísady na bázi vápníku, na bázi fosforu. Aditivity se silnou chemickou adsorpcí a reakčními kapacitami lze minimalizovat draslík a tím i související spékání popele, ukládání a struskovatění při spalování biomasy. Kapacita daného aditiva je značně podmíněna hmotností/molárními poměry mezi reaktivními složkami v aditivu a problematickými prvky v popelu biomasy, dále také reakčním prostředím a technologií spalování. [33]

Také je při použití potřeba brát v úvahu několik faktorů jako jsou: povaha aditiva, množství a způsob použití, povaha paliva a parametry spalovacího zařízení (provoz, doba spalování, teplotní gradienty, výkonnost odvzdušňování, interakce mezi palivem a aditivem). Jako povahu aditiva chápeme velikost částic, chemickou a fyzikální podobu a složení. Velikost částic má vliv na povrch a počet částic na jednotku hmotnosti na dopravu aditiva přes spalovací komory. Chemická a fyzikální podoba ovlivňuje pórovitost částic/hustotu a tedy i jejich plochu. Například takové hydroxidy a uhličitany se rozkládají endotermicky při zahřívání, vznikne částice jako nízkohustotní houba, které se snadno přepravují kotle. Těkavé aditivum  $3\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCl}_2$  účinně ovlivňuje slinování za vysokých teplot v případě, že je dobře smíchán s uhlím.

Přísady se přidávají kontinuálně nebo přerušovaně a to buď smícháním s uhlím nebo vstřikováním do proudu plynu. Přerušovaná aplikace je výhodná v tom, že za krátký úsek může být přidán vysoký poměr aditiva do uhelného popela, který pak výrazně mění složení popela usazujícího se na trubky kotle.[31] Tyto aditiva jsou definována jako chemické sloučeniny, které se přidávají přímo do paliva nebo jsou dávkovány přímo do kotle v malých množstvích k dosažení potřebných změn. Jsou tři hlavní oblasti, kde se aditiva široce využívala [34]:

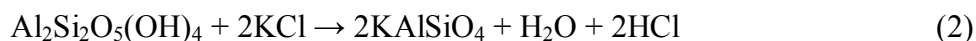


1. Manipulace s palivem: přísady mohou stabilizovat kapalná paliva (topný olej) při skladování a zlepšit jejich průtok nebo jejich tuhnutí. Aditiva mohou snížit množství uniklého prachu vznikajícího při transportu a skladování uhlí, prodloužit stabilitu uhelného kalu a zlepšit proces čištění uhlí.
2. Plynné a tuhé emise: Aditiva pomáhají snižovat množství SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, kouře a nespálených uhlovodíků vypouštěných z komína. SO<sub>x</sub> a NO<sub>x</sub> se pomocí aditiv může odstraňovat ve vápně/vápenných pračkách a zvýšit zachyt částic v elektrostatickém odlučovači. Aditiva urychlující oxidační reakce při spalování snižují vznik kouře a další produkty nedokonalého spalování.
3. Depozice z kotle a koroze: aditiva pomáhají snižovat vysokoteplotní produkty (struska a znečištění) a korozi. Také snižují nízkoteplotní znečištění a kondenzovanou kyselinovou korozi na povrchu kovových trubek.

Při spalování se mění uhlí na popel s malým množstvím těkavých produktů. Hrubší částice popela padají dolů v peci a těkavé látky spolu s menšími částicemi popela jsou vyneseny se spaliny z pece. V závislosti na teplotě mohou být částice z části nebo zcela roztaveny při spalování, což vede k vyšší pravděpodobnosti slepování částic k sobě a nalepování na konstrukci kotle. Přísady pro zmírnění depozic z vysokých teplot a problémy s korozi při spalování olejových paliv jsou relativně dobře vyvinuty a jsou úspěšné. Avšak při spalování uhlí nejsou výsledky tak dobré. Testy se spíše ubírají na vyhodnocení potenciálu pro zmírnění znečištění.[31] K minimalizaci bylo vyvinuto mnoho úsilí. Například nové typy kotlů a hořáků, regulace spalování, typy paliv, různé mechanické čištění využívající vysoce odolné slitiny a nakonec také použití chemických přísad, tzv. aditiv. [32]

Aditiva, která se používají pro minimalizování struskování a zanášení při spalování biomasy jsou: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, magnezit, kaolin, písek oxidu křemičitého, živec, dolomit, kalcinovaný dolomit, ofit, oxid železitý, zeolit, Ca(OH)<sub>2</sub>. [16,17,18] Kaolin je účinný při minimalizování plynných zásad v odcházejícím plynu ze spalování, prostřednictvím tvorby zásaditých hlinito křemičitanů s vyšší teplotou tavení. Další aditiva jako je bauxit, emathlit, bentonit, jíl, křemen a uhelný popel také poukazují, že do jisté míry snižují množství plynných zásad. Tyto aditiva fungují n principu Al – Si zásad. Pro biomasu s velkým obsahem chloru jsou účinné tzv. Ca zásady, které mají vysoký vliv na redukci alkalických chloridů ve spalínách. Takováto přísada je např.

$\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  apod.[43] Kaolin a zeolit mají vysokou kapacitu pro zachyt KCl Kaolin je však při spalování biomasy nejpoužívanější, protože obsahuje více chemicky reaktivní sloučeninu Kaolinit ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). Kaolinit váže chlorid draselný jako v rovnici 2 a 3:



Kaolin také omezuje spékání popela z biomasy. [44]

**Na zmírnění usazenin a problémů s korozí jsou aditiva, která fungují některými mechanismy:**

- Úprava fúzní teploty popele (např.  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ...)
- Vyvolání růstu krystalů v kapalně fázi v usazenině kvůli zvýšení viskozity a tím snížení tvorby strusky
- Odstranění jednotlivých hlavních komponent, které tvoří usazeniny (např.  $\text{SO}_3$  pomocí  $\text{MgO}$ , alkalické sírany pomocí křemeliny)
- Fyzikální narušení usazeniny vytvořením slabé štěpné plochy (např. vermikulit)

Fúzní teplotu popele lze upravit změnou poměru kyselých na zásadité složky v popelu. Avšak k tomuto postupu je třeba vysoké dávkování, což činí postup neekonomickým. Menší množství může být dostačující pouze pro změnu povrchových vlastností a následně ovlivní vznik usazenin. [31]

**Různá aditiva mohou reagovat různými účinky:**

- Mohou zachycovat popel chemickou adsorpcí a reakcemi
- Zachycování popele fyzikální adsorpcí a vymýváním ze spalovacích zařízení
- Zvýšením množství popela z biomasy teplotou tání k posílení inertních prvků/ sloučenin ve zbytcích popele
- Snížení množství popele z biomasy spékáním pomocí ředících a práškovacích účinků aditiv[32]

### 3.4.1. Nalco

Nalco je stabilní silně alkalická kapalina na bázi vody, která slouží k úpravě typu disperze paliva. V mé práci se budu věnovat konkrétnímu typu Nalco 8270, který jsem při stanoveních použila. Nalco 8270 funguje na principu obsahu hořčíku. Nalco 8270 je účinné při prevenci koroze a usazenin vznikajících jak při vysokých tak i při nízkých teplotách z fosilních paliv na kotli.

Výhody [38]:

- Neabrasivní charakter (nepřispívá k erozi hořáků)
- Eliminuje tvorbu strusky
- Velmi malá velikost částic – eliminace potenciálu pro ucpávání
- Redukuje vznik  $\text{SO}_3$  a zabraňuje žíravosti vystupujícího pecního plynu.
- Nízká viskozita – produkt umožňuje snadné čerpání a dávkování
- Vynikající stabilita při skladování, zmrazování a rozmrazování
- Zabraňuje spádu kyselých sazí
- Zabraňuje leptání pece sodíkem a sloučeninami vanadu
- Podporuje optimální přenos tepla – lepší účinnost

### 3.5. Index drobivosti, charakteristika strusky

Tyto indexy blíže popisují charakter strusky.

**Index drobivosti:**

Charakterizuje fyzikální vlastnosti depozit uhelného popele dle rovnice 4.

$$I_f = \left( \frac{Ba}{Aa} \right) x S_{\text{SO}_4} \quad (4)$$

Kde:

$I_f$  index drobivosti

$Ba$  hm.% ( $Na_2O + K_2O + CaO + MgO + Fe_2O_3$ ) z usazeniny

$Aa$  hm.% ( $Al_2O_3 + SiO_2 + TiO_2$ ) z usazeniny

$S_{SO_4}$  obsah síranů v usazenině

Nízký index vypovídá o větší drobivosti usazeniny. Účinné aditiva nemusí snížit množství popela, ale mohou změnit jeho fyzikální vlastnosti jako je drobivost a tím i lepší odstranění ofukovači.

### **Charakteristika strusky černouhelného popílku:**

Zvýšení podílu tavicích složek (vápenec) snižuje. Dále jako účinné tavidla využíváme: železné rudy, fluorit ( $CaF_2$ ) a sloučeniny obsahující bor jako např. kolemanit a ulexit. Železná ruda však může vytvářet strusky bohaté na železo, které jsou vysoce reaktivní a mohou napadat vyzdívky. Sloučeniny boru a fluoritu jsou zase nevhodné pro životní prostředí. Charakteristiku můžeme vyjádřit rovnicí 5.[31]

$$Rd = a \left( \frac{Y_f}{1-Y_f} \right)^b \quad (5)$$

Kde:

$Rd$  charakter strusky

$Y_f$  tavidlo složek popela ( $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $FeO$ )

$1-Y_f$  spařené složky ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ )

$a$  konstanta

$b$  hodnotící index

### 3.6. Základní indexy pro zhodnocení tvorby strusky a zanášení

Může se zdát, že je naprosto nemožné předpovědět struskovací, či zanášecí vlastnosti daného paliva. Po dlouhé době zkoumání bylo ale zjištěno, že tzv. zásadité sloučeniny (B) snižují teplotu tání, zatímco tzv. kyselé sloučeniny (A) teplotu zvyšují. Pro přesnější zjištění tavitelnosti popela byly stanoveny základní korelace mezi fúzní teplotou a standardním chemickým složením.[35]

#### Struskování:

Tam kde se jednotlivé částice popela se slepují, nízké teploty tání popela způsobují hromadění popela. Popel nabývá sklovité konzistence při teplotách stejných nebo vyšších jako teplota tání popela.[46]

*Základní poměr:* (B/A) – poměr kyselých oxidů/zásaditým oxidům - uvádí náchylnost ke struskování, viz. rovnice 6. Zhodnocení indexů pak zavádí tabulka 3.

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3} [-] \quad (6)$$

Tabulka 3: Základní poměr B/A [36]

Nízká	Střední	Vysoká
<0,5	0,5<B/A<1	>1

*Poměr železa – vápníku:* (I/C)- poměr oxidu železitého ku oxidu vápenatému definuje rovnice 7 a porovnání je uvedeno v tabulce 4

$$\frac{I}{C} = \frac{Fe_2O_3}{CaO} [-] \quad (7)$$

Tabulka 4: Poměr železa - vápníku[36]

Nízká	Střední	Vysoká
<0,31 nebo >3	<10,3<I/C<3	≠1

*Index Rs* – poměr kyselých oxidů ku zásaditým vynásobený obsahem síry v suchém stavu; index pro posuzování náchylnosti paliva k tvorbě popelových nánosů; struskových nánosů viz. rovnice 8. Porovnání poměru pak najdeme v tabulce 5.[9]

$$Rs = \frac{B}{A} x S(v \text{ suchém stavu}) [-] \quad (8)$$

Tabulka 5: Index Rs[36]

Nízká	Střední	Vysoká
<0,6	0,6<Rs<2	>2

#### Zanášení:

Charakterizuje schopnost tvořit nánosy.

*Zásady celkem: (TA)* – součet oxidu sodného a oxidu draselnému popisuje rovnice 9, srovnání pak nalezneme v tabulce 6.

$$TA = Na_2O + K_2O [-] \quad (9)$$

Tabulka 6: Zásady celkem[36]

Nízká	Střední	Vysoká
<0,3	0,3<TA<0,4	>0,4

*Index Rp* - index pro posuzování náchylnosti paliva k tvorbě popelových nánosů; popílkových nánosů[9]; poměr kyselých oxidů ku zásaditým vynásobený oxidem sodným dle rovnice 10, porovnání hodnot tabulka 7.

$$Rp = \frac{B}{A} x Na_2O [-] \quad (10)$$

Tabulka 7: Index Rp[36]

Nízká	Střední	Vysoká
<0,2	0,2<Rp<0,5	>0,5

*Fu – koeficient zanášení*:- poměr kyselých oxidů ku zásaditým vynásobený součtem oxidu sodného a oxidu draselného dle rovnice 11, tabulka 8 poskytuje hodnoty pro srovnání. [36]

$$Fu = \frac{B}{A} x (Na_2O + K_2O) [-] \quad (11)$$

Tabulka 8: Koeficient zanášení [36]

Nízká	Střední	Vysoká
$\leq 0,6$	-	$0,6 < Fu \leq 40$

Poměr kyselých a zásaditých oxidů určuje tzv. *Teuneho číslo*, které charakterizuje tavitelnost popela podle rovnice 12. Tabulka 9 pak nabízí hodnoty ke srovnání [37]:

$$K_T = \frac{\text{kyselé}}{\text{zásadité}} = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{Fe_2O_3 + CaO + MgO} [-] \quad (12)$$

Tabulka 9: Teuneho číslo[37]

Tavitelnost	$K_T$	Teplota tečení
	1	°C
Lehce tavitelné	2,4	1150
Středně tavitelné	2,4 – 2,5	1150 - 1400
Těžce tavitelné	2,5	1400

### 3.7. Stanovení základních parametrů uhlí

Mezi tyto parametry patří stanovení obsahu hrubé vody, obsahu vody analytické, obsahu vody veškeré, stanovení popelnatosti, spalného tepla a výhřevnosti. Jednotlivé metody se řídily těmito normami [39]:

- ČSN 44 1377 Tuhá paliva – Stanovení obsahu vody;
- ČSN ISO 1928 (44 1352) Tuhá paliva – Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti;
- ČSN ISO 1171 (44 1378) Tuhá paliva – Stanovení popela.

#### Stanovení obsahu hrubé vody

Je to obsah vody ve vzorku, která se odpaří po vysušení ze vzorku paliva (vzorky paliva se uchovávají ve vzorkovnicích viz. obrázek 3 při dosažení přibližné rovnováhy s atmosférou, které byl vystaven. Podstatou zkoušky je stanovit obsah vody ve vzorku uhlí po vysušení za předem stanovených podmínek do konstantní hmotnosti. Obsah vody v procentech se počítá poté z úbytku hmotnosti po sušení.





*Obrázek 3: Vzorkovnice se vzorky*

K dispozici je elektrická sušárna zajišťující stálou teplotu sušení  $40^{\circ}\text{C}$  až  $50^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$  a  $105^{\circ}\text{C}$  až  $110^{\circ}\text{C}$  s přirozenou nebo nucenou cirkulací vzduchu pro předsoušení a sušení vzorků. Předsoušení se provádí na kovových podnosech z nerezové oceli a dosoušení pak v kovových váženkách. Po vysušení a vytažení vzorku z pece je potřeba vzorek uchovávat před vážením v exsikátoru.

Maximální rozměr zrna pro vzorek ke stanovení hrubé vody nesmí být větší než 20 mm.



*Obrázek 4: Navážka vzorku pro stanovení obsahu hrubé vody*

Vzorek o hmotnosti 500g se vysype ze vzorkovnice na předem zvážený hliníkový podnos a řádně promíchá. Navážka se prováděla jako na obrázku 4. Poté se podnos umístí do sušárny a suší se při teplotě  $50 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  4 hodiny za občasného promíchání. Poté se vysušený vzorek zváží a odečte se hmotnost podnosu. Tím získáme hmotnost vzorku po vysušení.[39]

## Stanovení obsahu vody analytické

Obsah analytické vody se stanoví ve vzorku o velikosti zrna pod 0,212 mm. Velikost zrna se upravuje na vibračním mlýnu viz. obrázek 5 a 6. Vzorek se připravuje ze vzorku po stanovení obsahu hrubé vody. Sušení probíhá za teploty  $105 - 110^\circ\text{C}$ .



Obrázek 5: Vibrační mlýn

Nejprve se zváží skleněná váženka i s víčkem. Tato hmotnost se zaznamená. Poté se do váženky naváží 1g vzorku (přesnost 0,0001g). Otevřená váženka se vloží do předem vyhřáté sušárny podle obrázku 7 a zde se suší 2,5 hodiny. Poté se váženka ze sušárny vyjme, přiklopí víčkem a nechá chvíli na podložce ochladit. Po ochlazení se přemístí do exsikátoru jako na obrázku 8. Nakonec se váženka zváží a provede se výpočet obsahu vody analytické podle rovnice 12.[39]



Obrázek 6: Součásti vibračního mlýnu

### Výpočty:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_1} * 100 [\%] \quad (13)$$

Kde:

$m_2$  je hmotnost váženky (podnosu) se vzorkem před sušením v g

$m_3$  je hmotnost váženky (podnosu) se vzorkem po vysušení v g

$m_1$  je hmotnost navážky vzorku v g

Výsledky se uvádějí s přesností 0,1% pro obsah hrubé vody a 0,01% pro obsah vody analytické.[39]





*Obrázek 7: Sušárna se vzorky*



*Obrázek 8: Exsikátor*

## Stanovení obsahu veškeré vody

Jedná se o součet obsahu vody analytické a hrubé, podle rovnice 14. [39]

**Výpočty:**

$$W_t^r = W_{ex} + W^a * \frac{100 - W_{ex}}{100} [\%] \quad (14)$$

Kde:

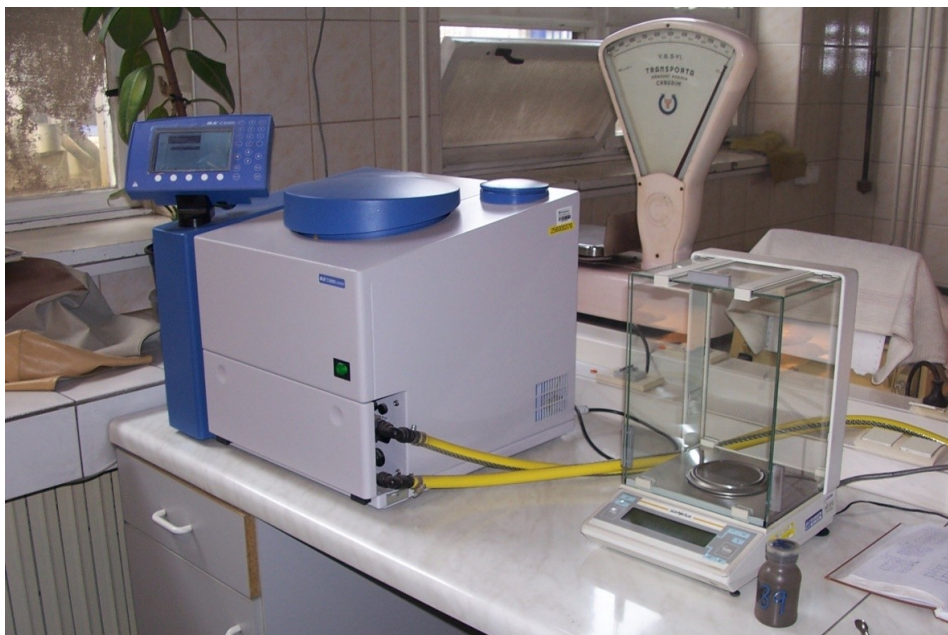
$W_t^r$  je obsah vody veškeré v %

$W_{ex}$  je obsah vody hrubé v %

$W^a$  je obsah vody analytické v %

## Stanovení spalného tepla

Odvážený vzorek analytického vzorku tuhého paliva se spálí v kyslíku za vysokého tlaku v tlakové nádobě kalorimetru, viz. obrázek 9. Vše za předepsaných podmínek. Vzorek paliva se naváží do čistého a suchého kelímku s přesností 0,0001g. Kelímek se poté vloží do kalorimetru do objímky a nad vzorek se opatrně uchytí zapalovací drátek (výška nad vzorkem cca 5mm). Na zapalovací drátek se uváže zapalovací bavlnka a volný konec se zasune do navážky paliva. Do kalorimetrické tlakové nádoby se odměří 1ml demineralizované vody. Tlaková nádobka, jako na obrázku 10, se sestaví, zkontroluje a uzavře. Připojí se plnicí zařízení kyslíku. Poté se nádobka naplní kyslíkem a vloží se do nádoby s demineralizovanou vodou (chladicí) v kalorimetru. Nakonec se připojí přívody zapalovacího drátku. Zařízení se uvede do provozu. Po ukončení analýzy je nutné zkontrolovat obsah tlakové nádoby a kelímku. Jestliže obsahují saze nebo nespálené zbytky, je třeba stanovení opakovat.[39]



*Obrázek 9: Kalorimetr*

## **Stanovení výhřevnosti**

Hodnota výhřevnosti paliva při konstantním objemu a tlaku se vypočítá z hodnoty spalného tepla podle rovnice 15.[39]



*Obrázek 10: Kalorimetrická bomba*

## Výpočet spalného tepla

Výčet spalného tepla se provádí přímo zapsáním hodnoty udané na kalorimetru po dokončení procesu analýzy. Není potřeba jej počítat.[39]

## Výpočet výhřevnosti

Mezi hodnotou spalného tepla a výhřevnosti je hlavním rozdílem fyzikální stav vody v reakčních zplodinách.

Pro zjednodušení výpočtu se obecně neberou v potaz opravy na výpočet spalného tepla při konstantním tlaku. Výpočet výhřevnosti se provádí dle vztahu [39]:

$$Q_v = Q_s - 0,02442 * (W_t + 8,94 * H_t) \quad (15)$$

Kde:

$Q_v$  je výhřevnost v MJ/kg

$Q_s$  je spalné teplo paliva v původním stavu v MJ/kg

$W_t$  je obsah vody veškeré v % (voda hrubá + analytická)

$H_t$  je obsah vodíku v původním stavu v %

## Stanovení obsahu popela – gravimetrická metoda

Vzorek paliva je nutné zahřívat na teplotu 815 °C za přístupu vzduchu předepsanou rychlostí. Vzorek se zpopelňuje při této teplotě do konstantní hmotnosti. Obsah popela je pak dán výpočtem z hmotnosti zbytku po spálení.

Ke spalování se používá muflová pec, viz. obrázek 11, s regulací teploty do 1200°C. Vzorek paliva se navažuje do porcelánových nepolévaných misek výšky do 20 mm a průměru cca 36 mm. Vzorek má hmotnost 1g. Nové ještě nepoužité misky je nutné před stanovením žíhat při teplotě 815°C po dobu 30 minut.





Obrázek 11: Muflová pec

Ke stanovení je použit analytický vzorek o velikosti zrna pod 0,212 mm. Vzorek paliva ve vzorkovnici musí být řádně promíchaný a vlhkost musí být v rovnováze s atmosférou laboratoře.

Do předem zvážené čisté a suché misky se odváží 1g vzorku paliva s přesností 0,0001g. Obě hmotnosti se zapíší. Miska se vloží do muflové pece o teplotě laboratoře. Poté se teplota zvyšuje na 500°C po dobu 60 minut a při této teplotě se spaluje 30 minut. Dále se teplota zvýší na 815°C a při této teplotě se vzorek spaluje dalších 75 minut. Nakonec se miska z pece vyjme na podložku a nechá se ochladit, foto popele je na obrázku 12. Poté se dá do exsikátoru. Vychladlá miska se zváží a výpočet se provede podle rovnice 16.[39]



Obrázek 12: Popel



### Výpočet obsahu popela

Výpočet se provádí dle vzorce [39]:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100[\%] \quad (16)$$

Kde:

$m_1$  je hmotnost misky v g;

$m_2$  je hmotnost misky s navážkou vzorku v g;

$m_3$  je hmotnost misky s popelem v g.

### RTG fluorescenční spektroskopie

RTG fluorescenční spektrometrie je analytická metoda, která slouží k posouzení prvkového složení sypkého materiálu a také pro charakteristiku nátěrových systémů. Lze ji využít pro analýzy širokého spektra prvků. Je možné analyzovat pevné vzorky větší zrnitosti, pudry nebo také kapaliny.[40]

## 4. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsem se zaměřila na vlastní analýzy a rozbor výsledků a dílčí výpočty. U vzorků uhlí a uhlí s biomasou jsem nejprve prováděla základní stanovení, tzn. spalné teplo, výhřevnost, obsah zbytkové vody a popelnatost. Porovnávala jsem, jak se jednotlivé hodnoty liší od hodnot suchého uhlí. Poté jsem se dostala k vlastní analýze pomocí RTG spektrometru, který vyhodnotil z popele vzorků obsah oxidů, a ty jsem následně porovnávala a zjistila vliv aditiv na spalování. Jednotlivé metody se řídily těmito normami [39]:

- ČSN 44 1377 Tuhá paliva – Stanovení obsahu vody;
- ČSN ISO 1928 (44 1352) Tuhá paliva – Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti;
- ČSN ISO 1171 (44 1378) Tuhá paliva – Stanovení popela.

### 4.1. Úprava vzorků a získání analytického vzorku

Vzorek uhlí se musel před vlastní analýzou upravit pro potřeby analýzy. Surové uhlí nebylo homogenní a neodpovídalo dané zrnitosti. Tudíž jako první jsem provedla drcení a mletí. Drcení jsem prováděla na laboratorním čelistovém drtiči, kde jsem získala vzorek o průměrné zrnitosti 10 mm. Dále jsem použila vibrační laboratorní mlýn, kde jsem vzorek uhlí rozemlela na prášek velikosti zrna okolo 0,05 mm. Stejným způsobem jsem upravila pro peletky štěpky, abych taktéž získala prášek. Vzorek pro laboratorní účely bylo nutné homogenizovat tzv. kvartací. Jde o proces, kdy se kompletní vzorek řádně promíchá, rozloží na podložku buď ve tvaru čtverce, případně kruhu a následně se rozdělí úhlopříčkami na 4 stejné díly. Vždy dvě protilehlé části se odstraní a dvě opět smísí a proces se opakuje, dokud se nezíská reprezentativní vzorek. Kvartaci jsem prováděla mechanickým kvartovačem. Reprezentativní vzorek byl poté určen k analýzám. Ke vzorkům pro spálení a následnou analýzu RTG fluorescenční spektrometrie jsem musela přidat aditivum – Nalco. Nalco jsem připravila naředěním dle kapitoly *Vyhodnocení analýz stanovení chemismu popela* a přidala jej ke vzorkům 2,4 a 6. Vzorky pro základní stanovení jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Vzorky základního stanovení

Vzorky	Uhlí 100%	Uhlí + biomasa (95:5)	Uhlí + biomasa (90:10)
Množství surovin	1g vzorku uhlí	Uhlí 0,95g + 0,05g biomasy	Uhlí 0,9g + 0,1g biomasy

Vzorky pro stanovení chemismu popele:

1. Uhlí 100%
2. Uhlí + NALCO (10kg:100t suroviny)
3. Uhlí + biomasa (90:10)
4. Uhlí + biomasa (90:10) + NALCO (10kg:100t suroviny)
5. Uhlí + biomasa (95:5)
6. Uhlí + biomasa (95:5) + NALCO (10kg:100t suroviny)

## 4.2. Metodika analýzy

### Stanovení obsahu hrubé vody

**Chemikálie:** vzorek uhlí propláستku

**Pomůcky:** hliníkový táč, vzorkovnice, hliníková lžice, sušárna, analytické váhy

**Postup zkoušky:** Obsah vzorkovnice se vzorkem uhlí o hmotnosti 500g jsem vysypala na hliníkový táč a důkladně rozprostřela. Poté jsem táč vložila do sušárny o teplotě 50°C a vzorek se při této teplotě sušil 4 hodiny. Po uplynutí doby jsem táč vytáhla, nechala vychladit a poté se zvažila. Obsah hrubé vody jsem stanovila odečtem váhy tácu se vzorkem po vysušení od váhy tácu se vzorkem před vysušením.[39]

### Stanovení vody v analytickém vzorku

**Chemikálie:** vzorek uhlí propláستku, peletky slámy, silikagel

**Pomůcky:** váženky, štětec, laboratorní lžička, sušárna, analytické váhy, kleště, exsikátor

**Postup zkoušky:** Stanovovala jsem 3 vzorky. Vzorek čistého uhlí, vzorek uhlí s biomasou v poměru 95:5 a vzorek uhlí s biomasou v poměru 90:10. Vždy jsem odvážila 1g každého vzorku do předem zvážených váženek na analytických vahách. Poté jsem navážené vzorky vložila do sušárny, z váženek odejmula víčko a zde se vzorek sušil při teplotě 105°C po dobu 2,5 hodin. Po uplynutí doby jsem pomocí kleští víčka opět nasadila a váženky jsem přenesla do exsikátoru. Po vychladnutí jsem váženky zvážila a hmotnosti zapsala do protokolu a vypočetla obsah analytické vody.[39]

### **Stanovení celkového obsahu vody**

**Postup zkoušky:** Stanovení jsem provedla výpočtem součtu vody analytické a hrubé.[39]

### **Stanovení spalného tepla**

**Chemikálie:** demineralizovaná voda, vzorek uhlí propláستku, peletky slámy

**Pomůcky:** kalorimetr, kalorimetrická bomba, automatická pipeta, pinzeta, kelímek do kalorimetrické bomby, analytické váhy, laboratorní lžička, štětec, bavlnka

**Postup zkoušky:** Do čistého kelímku jsem navážila 1g vzorku. Kelímek jsem vložila do jímky na kelímek v bombě. Připevnila jsem knotek ve formě bavlnky k drátku v bombě a zasunula jej do kelímku se vzorkem tak, aby se nedotýkal stěn kelímku. Do bomby jsem přilila 1ml destilované vody. Bombu jsem sestavila, důkladně uzavřela a vložila do kalorimetru. Poté jsem kalorimetr uvedla do provozu. Po ukončení měření jsem z kalorimetru opsala potřebné hodnoty a vyjmula bombu. Bombu jsem poté rozebrala, umyla a osušila k dalšímu použití.[39]

## **Stanovení výhřevnosti**

**Postup zkoušky:** Stanovení výhřevnosti jsem provedla výpočtem ze stanovení spalného tepla.[39]

## **Stanovení obsahu popela**

**Chemikálie:** vzorek uhlí proplástek, peletky slámy

**Pomůcky:** keramické žíhací misky, laboratorní lžička, analytické váhy, žíhací muflová pec, hliníkový táč, štětec, kleště

**Postup zkoušky:** Do předem zvážených žíhacích misek jsem navážila gram z každého vzorku. Poté jsem je vložila do muflové pece, kde se vzorky spalovaly při teplotě 815°C. Nejprve se teplota po dobu 60 minut zvyšovala na 500°C, při této teplotě se vzorky spalovaly 30 minut a následně se teplota zvýšila na 815°C a spalovaly se 75 minut. Po uplynutí doby jsem vzorky z pece pomocí kleští vyjmula, položila na hliníkový táč a nechala mírně ochladit a poté vložila do exsikátoru a nechala je vychladit úplně. Po vychlazení jsem vzorky zvážila a vypočetla obsah popela.[39]

## **Stanovení chemismu popela**

**Postup práce:** Poté jsem namíchala vzorky směsí uhlí, slámy a Nalco v daných poměrech a spálila je v muflové peci při 850°C. Vzorky popele jsem sesypala do vzorkovnic a odeslala na analýzu pro zjištění obsahu oxidů v jednotlivých vzorcích do Centra nanotechnologií.[39]

## 5. VYHODNOCENÍ ANALÝZ

V této kapitole jsem se zaměřila na vyhodnocení naměřených a stanovených hodnot analýz. Základní analýzy jsem prováděla v laboratoři demineralizační stanice OJ Teplárny Teplárna Vítkovice a analýzu RTG fluorescenční spektrometrie jsem zaslala na Centrum nanotechnologií.

### 5.1. Vyhodnocení analýz základních parametrů vzorků

V následující tabulce 11 jsou uvedeny typy vzorků a váhy jednotlivých surovin použitých pro analýzu vztažených na 1 g vzorku pro analýzu. Využila jsem vzorek uhlí proplásku a vzorek biomasy peletek slámy.

Tabulka 11: Vzorky základního stanovení uhlí a biomasy

Vzorky	Uhlí 100%	Uhlí + biomasa (95:5)	Uhlí + biomasa (90:10)
Množství surovin	1g vzorku uhlí	Uhlí 0,95g + 0,05g biomasy	Uhlí 0,9g + 0,1g biomasy

Peletky slámy jsem rozemlela na prášek tak jako uhlí na vibračním mlýně. Pro analýzu obsahu hrubé vody v jednotlivých vzorcích jsem použila vzorek o hmotnosti 500g.

#### Vzorek č.1 (Uhlí 100%):

Tabulka 12: vzorek č.1 - hrubá voda, anal. voda, celková voda

Podnos	g	551,7000	Váženka	g	15,6288
Původní vzorek	g	500,0000	Analytický vzorek	g	1,0007
Podnos + vzorek	g	1051,7000	Váženka + vzorek	g	16,6295
Podnos + suchý vzorek	g	1026,2000	Váženka + sušina	g	16,6233
Vysušený vzorek	g	25,5000	Sušina	g	0,0062
<b>Hrubá voda</b> $W_{ex}^r$	%	5,10000	<b>Voda v analyt. vz. <math>W^a</math></b>	%	0,6200
			<b>Celk. obsah vody <math>W_t^r</math></b>	%	5,6880

Tabulka 13: vzorek č 1 - popel, spalné teplo, výhřevnost

Žíhací miska	g	8,1447	<b>Vodík <math>H_t^r</math></b>	%	3,7400
Analytický vzorek	g	1,0004	<b>Spalné teplo <math>Q_s^a</math></b>	MJ / kg	21,4370
Miska + vzorek	g	9,1451	<b>Výhřevnost <math>Q_i^r</math></b>	MJ / kg	19,3883
Miska + popel	g	8,5097	<b>Spalné teplo (v pův. vzorku) <math>Q_s^r</math></b>	MJ / kg	20,3400
Popel	g	0,3650			
<b>Popel <math>A^a</math></b>	%	36,4900			

### Výpočty:

#### 1. Hrubá voda:

(podnos + vzorek) - (podnos + suchý vzorek) = hmotnost vysušeného vzorku

$$(1051,7) - (1026,2) = 25,5g \quad (17)$$

(vysušený vzorek) / (původní vzorek) \* 100 = procentuální obsah hrubé vody

$$(25,5) / 500 * 100 = 5,10\% \quad (18)$$

#### 2. Voda v analytickém vzorku:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_1} * 100 = \frac{16,6295 - 16,6233}{1,0007} * 100 = 0,62 [\%] \quad (19)$$

#### 3. Obsah veškeré vody:

$$W_t^r = W_{ex} + W^a * \frac{100 - W_{ex}}{100} = 5,10 + 0,62 * \frac{100 - 5,10}{100} = 5,68797[\%] \quad (20)$$

#### 4. Spalné teplo:

- Hodnota se přímo opisuje z kalorimetru

#### 5. Výhřevnost:

$$Q_v = Q_s - 0,02442 * (W_t + 8,94 * H_t) = 20,34 - 0,02442 * (5,687968 + 8,94 * 3,74) = 19,38832 \text{ MJ/kg} \quad (21)$$

## 6. Obsah popela:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 = \frac{8,5097 - 8,1447}{9,1451 - 8,1447} * 100 = 36,49[\%] \quad (22)$$

### Vzorek č.2 (Uhlí + biomasa 95:5):

Tabulka 14: vzorek č.2 - hrubá voda, anal. voda, celková voda

Podnos	g	557,2000	Váženka	g	15,0754
Původní vzorek	g	500,0000	Analytický vzorek	g	1,0031
Podnos + vzorek	g	1057,2000	Váženka + vzorek	g	16,0785
Podnos + suchý vzorek	g	1028,3000	Váženka + sušina	g	16,0689
Vysušený vzorek	g	28,9000	Sušina	g	0,0096
<b>Hrubá voda</b> $W_{ex}^r$	%	5,7800	<b>Voda v analyt. vz.</b> $W^a$	%	0,9600
			<b>Celk. obsah vody</b> $W_t^r$	%	6,6817

Tabulka 15: vzorek č 2 - popel, spalné teplo, výhřevnost

Žíhací miska	g	7,9762	<b>Vodík</b> $H_t^r$	%	3,7400
Analytický vzorek	g	1,0008	<b>Spalné teplo</b> $Q_s^a$	MJ / kg	21,1200
Miska + vzorek	g	8,9770	<b>Výhřevnost</b> $Q_i^r$	MJ / kg	18,9196
Miska + popel	g	8,3291	<b>Spalné teplo (v pův. vzorku)</b> $Q_s^r$	MJ / kg	19,9000
Popel	g	0,3529			
<b>Popel</b> $A^a$	%	35,2600			

### Výpočty:

#### 1. Hrubá voda:

(podnos + vzorek) - (podnos + suchý vzorek) = hmotnost vysušeného vzorku

$$(1057,2) - (1028,3) = 28,9g \quad (23)$$

(vysušený vzorek) / (původní vzorek) \* 100 = procentuální obsah hrubé vody

$$(28,9) / 500 * 100 = 5,78\% \quad (24)$$

#### 2. Voda v analytickém vzorku:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_1} * 100 = \frac{16,0785 - 16,0689}{1,0031} * 100 = 0,96 [\%] \quad (25)$$



### 3. Obsah veškeré vody:

$$W_t^r = W_{ex} + W^a * \frac{100 - W_{ex}}{100} = 5,78 + 0,96 * \frac{100 - 5,78}{100} = 6,681717 [\%] \quad (26)$$

### 4. Spalné teplo:

- Hodnota se přímo opisuje z kalorimetru

### 5. Výhřevnost:

$$Q_v = Q_s - 0,02442 * (W_t + 8,94 * H_t) = 19,9 - 0,02442 * (6,681717 + 8,94 * 3,74) = 18,9196 \text{ MJ/kg} \quad (27)$$

### 6. Obsah popela:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 = \frac{8,3291 - 7,9762}{8,977 - 7,9762} * 100 = 35,26 [\%] \quad (28)$$

## Vzorek č.3 (Uhlí + biomasa 90:10):

Tabulka 16: vzorek č.3 - hrubá voda, anal. voda, celková voda

Podnos	g	552,3000	Váženka	g	15,9544
Původní vzorek	g	500,0000	Analytický vzorek	g	1,0006
Podnos + vzorek	g	1052,3000	Váženka + vzorek	g	16,9550
Podnos + suchý vzorek	g	1023,0000	Váženka + sušina	g	16,9433
Vysušený vzorek	g	29,3000	Sušina	g	0,0117
<b>Hrubá voda</b> $W_{ex}^r$	%	5,8600	<b>Voda v analyt. vz. <math>W^a</math></b>	%	1,1700
			<b>Celk. obsah vody <math>W_t^r</math></b>	%	6,9608

Tabulka 17: vzorek č. 3 - popel, spalné teplo, výhřevnost

Žíhací miska	g	10,7350	<b>Vodík <math>H_t^r</math></b>	%	3,7400
Analytický vzorek	g	1,0001	<b>Spalné teplo <math>Q_s^a</math></b>	MJ / kg	20,7700
Miska + vzorek	g	11,7351	<b>Výhřevnost <math>Q_i^r</math></b>	MJ / kg	18,5664
Miska + popel	g	11,0773	<b>Spalné teplo <math>Q_s^r</math></b>	MJ / kg	19,5500
Popel	g	0,3423			
<b>Popel <math>A^a</math></b>	%	34,2300			

### Výpočty:

#### 1. Hrubá voda:

(podnos + vzorek) - (podnos + suchý vzorek) = hmotnost vysušeného vzorku

$$(1052,3) - (1023) = 29,3\text{g} \quad (29)$$

(vysušený vzorek) / (původní vzorek) \* 100 = procentuální obsah hrubé vody

$$(29,3) / 500 * 100 = 5,86\% \quad (30)$$

#### 2. Voda v analytickém vzorku:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_1} * 100 = \frac{16,955 - 16,9433}{1,0006} * 100 = 1,17 [\%] \quad (31)$$

#### 3. Obsah veškeré vody:

$$W_t^r = W_{ex} + W^a * \frac{100 - W_{ex}}{100} = 5,86 + 1,17 * \frac{100 - 5,86}{100} = 6,960778 [\%] \quad (32)$$

#### 4. Spalné teplo:

- Hodnota se přímo opisuje z kalorimetru

#### 5. Výhřevnost:

$$Q_v = Q_s - 0,02442 * (W_t + 8,94 * H_t) = 19,55 - 0,02442 * (6,960778 + 8,94 * 3,74) = 18,5664 \text{ MJ/kg} \quad (33)$$

#### 6. Obsah popela:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} * 100 = \frac{11,0773 - 10,735}{11,7351 - 10,735} * 100 = 34,23 [\%] \quad (34)$$

## 5.2. Srovnání základních analýz jednotlivých vzorků:

Tabulka 18: srovnání zákl. analýz jednotlivých vzorků

	Uhlí 100%	Uhlí + biomasa (95:5)	Uhlí + biomasa (90:10)
<b>Hrubá voda</b>	5,10	5,78	5,86
<b>Analytická voda</b>	0,62	0,96	1,17
<b>Celková voda</b>	5,69	6,68	6,96
<b>Popel</b>	36,49	35,26	34,23
<b>Spalné teplo</b>	20,34	19,90	19,55
<b>Výhřevnost</b>	19,39	18,92	18,57

Ze srovnání můžeme vidět, že v případě obsahu hrubé vody je nejvyšší u vzorku uhlí obsahujícího 10% biomasy. Je to zřejmě způsobeno vyšším obsahem vody ve slámě ve formě buněčného obsahu rostliny, kde je obsah vody přirozeným jevem. Rostlinná biomasa bývá velmi hygroskopická. S ubývajícím množstvím slámy ve vzorku voda klesá. Totéž se týká i obsahu vody v analytickém vzorku. Čím větší je tedy obsah slámy ve vzorku, tím je vyšší obsah vody.

Za to s přibývajícím obsahem biomasy – slámy klesá popelnatost. Uhlí jako takové vytváří velké množství popela a přidavkem 5% slámy jsem snížila vznik popela cca o 1%. S přidavkem 10% slámy až o 2%. Tudíž využití biomasy – slámy ve spalovacím procesu se v tomto ohledu jeví jako vhodné.

Avšak v případě hodnot spalného tepla tomu již tak není. Čím je vyšší obsah slámy, tím nižší hodnota spalného tepla. Totéž sleduji u výhřevnosti. Vyšší obsah slámy snižuje výhřevnost paliva, což může být následek vyšší vlhkosti. Vlhkost rostlinných paliv značně ovlivňuje výhřevnost.

### **5.3. Vyhodnocení analýz změny chemismu popela**

#### **Vzorky ke stanovení:**

1. Uhlí 100%
2. Uhlí + NALCO (10kg:100t suroviny)
3. Uhlí + biomasa (90:10)
4. Uhlí + biomasa (90:10) + NALCO (10kg:100t suroviny)
5. Uhlí + biomasa (95:5)
6. Uhlí + biomasa (95:5) + NALCO (10kg:100t suroviny)

#### **Výpočet přídatku Nalco:**

10kg Nalco na 1000t suroviny

14,3 ml Nalco na 1 l vody → z toho 2,5 ml roztoku na 0,5kg suroviny.

Tabulka 19: Výsledky chemismu popela

Vzorek		1	2	3	4	5	6
Analyt	Jednotka	Vzorek	Vzorek	Vzorek	Vzorek	Vzorek	Vzorek
Na <sub>2</sub> O	hm. %	0,530	0,550	0,780	0,690	0,660	0,620
MgO	hm. %	1,740	2,660	2,090	1,940	2,260	2,300
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hm. %	24,400	22,900	19,200	22,300	22,100	22,500
SiO <sub>2</sub>	hm. %	59,400	57,600	61,900	60,900	59,100	59,200
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	hm. %	0,079	0,119	0,166	0,188	0,180	0,120
K <sub>2</sub> O	hm. %	3,380	2,890	3,130	3,490	3,210	3,150
CaO	hm. %	2,430	4,030	2,910	2,620	3,410	3,440
TiO <sub>2</sub>	hm. %	0,980	0,950	0,840	0,920	0,950	0,900
MnO	hm. %	0,090	0,126	0,121	0,100	0,116	0,109
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hm. %	4,830	5,640	6,200	4,850	5,660	5,350

V případě analýz 6 vzorků, 3 již obsahovaly přídavek aditiva Nalco, některé obsahy oxidů měly klesající tendenci, jiné naopak, jak můžeme vidět v tabulce 19. V první řadě jsem se zaměřila na vliv aditiva a vzrůst či pokles oxidů.

**Vzorek č. 1**, obsahující 100% uhlí, spolu **se vzorkem č. 2**, obsahující 100% uhlí s přídavkem Nalco: zde můžeme sledovat nárůst obsahu u oxidů Na<sub>2</sub>O, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Pokles naopak u oxidů Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>.

**Vzorek č. 3**, obsahující uhlí + sláma (90:10), spolu **se vzorkem č. 4**, obsahující přídavek Nalco: nárůst obsahu je u Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>. Pokles nastal u Na<sub>2</sub>O, MgO, SiO<sub>2</sub>, CaO, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Vzorek č. 5**, obsahující uhlí + sláma (95:5), spolu **se vzorkem č. 6**, obsahující přídavek Nalco: nárůst obsahu je u MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO. Pokles nastal u Na<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Když srovnáme mezi sebou **vzorky neobsahující Nalco**, tak obsah Na<sub>2</sub>O byl nejvyšší u vzorku č. 3 (0,78 hm.%) obsahující uhlí + sláma (90:10) a nejnižší u vzorku č. 1 (0,53 hm.%) se 100% uhlím. S nižším obsahem slámy se již obsah Na<sub>2</sub>O snižoval. Obsah MgO se s nižším obsahem slámy zvyšoval. Naopak obsah Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> byl nejvyšší u vzorku č. 1 (24,4 hm.%) se 100% uhlím a nejnižší u vzorku č. 3 (19,2 hm.%) s 10% slámy a s nižším obsahem slámy (5 hm.%) se obsah zase zvyšoval. Obsah SiO<sub>2</sub> vzrostl s přídavkem 10% slámy (61,9 hm.%) oproti 100% uhlí (59,4 hm.%), avšak s přídavkem 5% slámy už byl obsah (59,1 hm.%) o něco nižší oproti čistému uhlí (59,4 hm.%). Lze tedy předpokládat

klesající tendenci obsahu  $\text{SiO}_2$  při snižování poměru slámy:uhlí. Obsah  $\text{P}_2\text{O}_5$  s přidavkem 10% slámy ke vzorku uhlí (0,166 hm.%) výrazněji vzrostl oproti čistému uhlí (0,079 hm.%). Při přidavku 5% slámy ke vzorku však obsah  $\text{P}_2\text{O}_5$  ještě vzrostl. Je tedy možné, že s menšími obsahy slámy ve vzorku bude obsah  $\text{P}_2\text{O}_5$  vzrůstat. Obsah  $\text{K}_2\text{O}$  byl nejnižší při obsahu 10% slámy ve vzorku (3,13 hm.%), avšak s přidavkem 5% slámy již obsah (3,21 hm.%) začal růst, lze tedy usoudit, že při snižování obsahu slámy bude obsah  $\text{K}_2\text{O}$  stále narůstat.  $\text{CaO}$  při přidání 10% obsahu slámy ke vzorku se obsah (2,91 hm.%) znatelně zvyšuje oproti čistému uhlí (2,43 hm.%). Při přidavku 5% slámy se obsah ještě zvýšil. Obsah  $\text{TiO}_2$  byl nejnižší u obsahu 10% slámy ve vzorku uhlí (0,84 hm.%), avšak s 5% slámy se již obsah zvyšoval (0,95 hm.%). Naopak tomu je u obsahu  $\text{MnO}$ , kdy nejvyšší obsah byl u vzorku s 10% slámy (0,121 hm.%), který se postupně se snižováním obsahu slámy snižoval (0,116 hm.%), ale nejmenší obsah vykazuje vzorek se 100 % uhlí (0,09 hm.%). Obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  s přidavkem 10% slámy prudce vzrostl (6,2 hm.%) oproti vzorku s čistým uhlím (4,83 hm.%), ale při úbytku slámy na 5% se obsah snížil (5,66 hm.%). Je možné předpokládat obdobnou situaci s dalším úbytkem slámy.

Tedy při 10% obsahu slámy obsah oxidů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vzrostl. Naopak se snížil obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{TiO}_2$ . Ale při úbytku slámy na 5% se obsah oxidů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  snížil a můžeme předpokládat stejný vývoj při dalším úbytku slámy. U  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{CaO}$  obsah při dalším úbytku slámy naopak vzrůstal. U obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{TiO}_2$  došlo při přidavku 5% slámy k nárůstu obsahu. Výhodný se tedy jeví u těchto oxidů 10% obsah slámy.

Vliv obsahu biomasy na obsah oxidů **při přidavku Nalco**. U 10% přidavku slámy do vzorku s přidavkem Nalco se obsah oxidů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{K}_2\text{O}$  zvýšil. Ale u oxidů  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se naopak obsah snížil. Co se týče přidavku 5% slámy, došlo u původně zvýšených obsahů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{K}_2\text{O}$  k opaku – poklesu obsahu těchto oxidů, ale obsahy byly stále vyšší než u čistého uhlí s přidavkem Nalco. Naopak tam, kde došlo původně k poklesu ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se při 5% přidavku slámy obsah opět zvýšil. Výjimkou je  $\text{TiO}_2$ , který má stále se snižující tendenci obsahu.

### Výpočet indexů:

V této části jsem porovnávala hodnoty indexů jednotlivých vzorků mezi sebou v tabulce 20. Vždy jsem porovnávala v rámci jednoho indexu vzorek bez přídavku Nalco a s přídavkem Nalco, tzn. vzorek č. 1 a č. 2, č. 3 a č. 4, č. 5 a č. 6.

Tabulka 20: Indexy

Vzorek		1	2	3	4	5	6
Index	Jednotka	Vzorek	Vzorek	Vzorek	Vzorek	Vzorek	Vzorek
(B/A)	-	0,19	0,19	0,18	0,16	0,19	0,18
Poměr železa - vápníku	-	1,99	1,40	2,13	1,85	1,66	1,56
Rs index	-	6,00	6,00	5,72	5,01	5,74	5,58
TA	-	3,91	3,44	3,91	4,18	3,87	3,77
Rp index	-	10,26	10,65	14,38	11,15	12,21	11,15
Koeficient zanášení - Fu	-	0,76	0,67	0,72	0,68	0,72	0,68
Teuneho číslo	-	9,31	6,53	7,24	8,84	7,17	7,37

Co se týče **základního poměru (B/A)**, u vzorku č. 1 se 100% uhlí (0,19) při přídavku Nalco (vzorek č. 2 - 0,19) nedošlo ke změně hodnoty. Naopak přídavkem Nalco ke vzorku obsahujícím uhlí + sláma (90:10) (vzorek č. 3 - 0,18 a č. 4 - 0,16) došlo tímto aditivem ke snížení hodnoty poměru a totéž nastává i při přídavku Nalco ke vzorku uhlí + sláma (95:5) (vzorek č. 5 - 0,19 a č. 6 - 0,18). Můžu tedy říci, že Nalco má za následek snížení vzniku strusky při obsahu slámy při spalování s uhlím. Pakliže srovnám jednotlivé vzorky s ohledem na náchylnost ke vzniku strusky, nejnižší hodnotu má vzorek č. 4 - 0,16 (uhlí 90% : sláma 10% : Nalco) a nejvyšší vzorek č. 1 - 0,19 (100% uhlí) a č. 2 - 0,19 (100% uhlí + Nalco). Pokud tedy vyžadujeme nejnižší struskotvornost, tak je nejlepší kombinace 90% uhlí, 10% slámy a přídavek Nalco. Veškeré hodnoty však jsou menší než 0,5, tudíž náchylnost ke struskování je velmi nízká.

**U poměru železa – vápníku**, první vzorek čistého uhlí má relativně vysokou hodnotu 1,99. Po přidání aditiva hodnota 2. Vzorku výrazně klesla na hodnotu 1,4. Totéž nastalo u vzorku č. 3 - 2,13 a č. 4 - 1,85 a také č. 5 - 1,66 a č. 6 - 1,56. Po přidání aditiva hodnota výrazně klesla, tudíž můžu říci, že toto aditivum (Nalco) snižuje poměr železa -

vápníku. Nejvyšší hodnotu tohoto poměru však vykazoval vzorek č. 3 - 2,1306 s 10% slámy a bez Nalco. Taktéž tyto hodnoty spadají do hodnot nízké struskovitosti.

**Poměr struskových nánosů - Rs** se u vzorku č. 1 - 6,00 a 2 - 6,00 nelišil. Tady nemělo aditivum žádný vliv. U ostatních vzorků mělo mírnou klesající tendenci (vzorek č. 3 - 5,72 a č. 4 - 5,01; vzorek č. 5 - 5,74 a č. 6 - 5,58), tudíž nějaký vliv zde aditivum má. Veškeré vzorky měly hodnotu vyšší než 2, tudíž náchylnost ke tvorbě struskových nánosů je vysoká.

**U poměru zásady celkem (TA)** je u vzorku č. 1 - 3,91 v porovnání s vzorkem č. 2 - 3,44 nižší hodnota. U vzorku č. 3 - 3,91 a č. 4 - 4,18 se hodnota naopak zvýšila. Je tedy možné, že zde má Nalco naopak vliv na zvýšení zanášení. U posledních dvou vzorků (č. 5 - 3,87 a č. 6 - 3,77) se již hodnota mírně snížila. Nejvyšší hodnota byla u vzorku č. 4 s 10% slámy a přídatkem Nalco. Veškeré hodnoty tohoto indexu jsou bohužel nad hodnotou 0,4, tudíž náchylnost k zanášení je velmi vysoká.

**Index popílkových nánosů - Rp** ukazuje, že u některých vzorků došlo po přidání aditiva k mírnému poklesu. Týká se to vzorku č. 3 - 14,38 a vzorku č. 4 - 11,15; u vzorku č. 5 - 12,21 a č. 6 - 11,15. Naopak ke zvýšení hodnoty indexu Rp došlo u vzorku č. 1 - 10,26 a č. 2 - 10,65. Nejvyšší hodnotu vykazoval vzorek č. 3 - 14,38, směs uhlí 90% + sláma 10%. Veškeré hodnoty také jsou vyšší než 0,5, tudíž tendence vykazuje vysokou tvorbu popílkových nánosů.

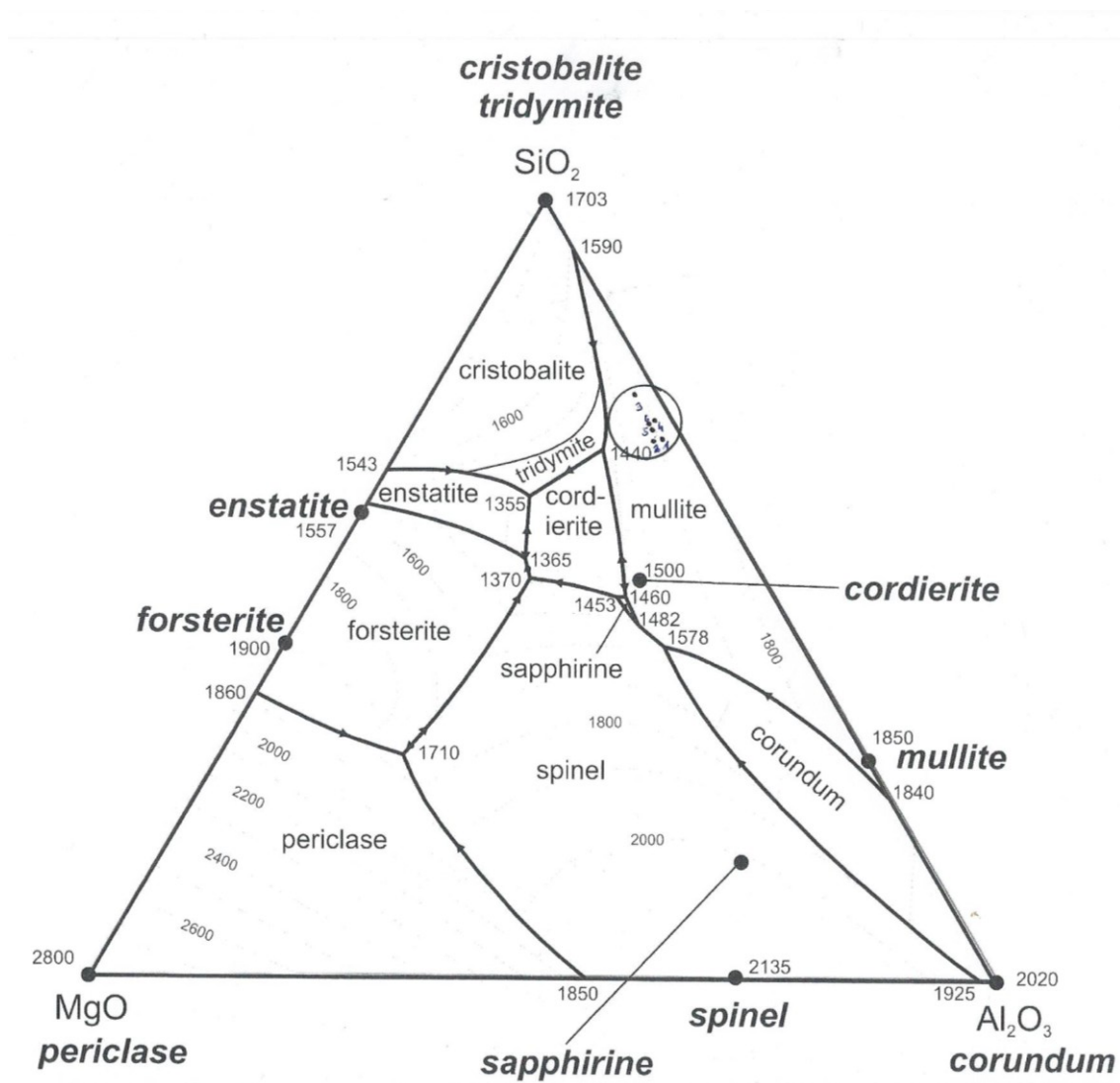
**Koeficient zanášení - Fu** měl u všech vzorků po přidání Nalco snižující hodnoty. Hodnota vzorku č. 1 - 0,76 na hodnotu vzorku č. 2 - 0,67, hodnota vzorku č. 3 - 0,72 na hodnotu vzorku č. 4 - 0,68, hodnota vzorku č. 5 - 0,72 na hodnotu vzorku č. 6 - 0,68. Hodnoty vzorků 3 a 5, 4 a 6 se nelišily. Nejvyšší byla u vzorku č. 1 - 0,76 s čistým uhlím. Všechny hodnoty jsou však vyšší než 0,5, tudíž náchylnost na zanášení bude vysoká.

**Teuneho číslo** má snižující charakter pouze u vzorku č. 2 - 6,53 s čistým uhlím po přídatku Nalco proti vzorku č. 1 - 9,31 s čistým uhlím. Zde je výhodné aditivum použít. Ale u ostatních vzorků se po přidání aditiva hodnoty zvýšily (u vzorku č. 3 - 7,24 na hodnotu vzorku č. 4 - 8,84, u vzorku č. 5 - 7,17 na hodnotu vzorku č. 6 - 7,37). Nejvyšší hodnotu vykazuje vzorek č. 1 - 9,31 s čistým uhlím. Všechny hodnoty jsou nad 2,5, tudíž tavitelnost popela je těžká s teplotou nad 1400°C (čím vyšší teplota tavitelnosti, tím hůře dochází k tavení).



### Ternární $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ fázový diagram:

Ukazuje teplotu tavitelnosti jednotlivých 6 vzorků a jaký minerál tavením vzniká.



Obrázek 13: ternární diagram

Z diagramu jsem zjistila, že veškeré vzorky ve fázovém diagramu, obrázek 13, se pohybují okolo 1440°C, což odpovídá minerálu mullitu.

## 6. ZÁVĚR

Diplomová práce se týkala vlivu aditiva na charakteristiku produktů po spalování biomasy. Z výsledků mohu usoudit, že aditivum Nalco má významný vliv na omezení struskování, ale nesnižuje zanášení, dokonce jej může i zvýšit. V průběhu celé své práce jsem se seznámila s problematikou aditiv a jejich vlivem na spalování uhlí a spoluspalování uhlí s biomasou. Zaměřila jsem se na aditivum Nalco, které jsem využívala při stanoveních. V první řadě jsem provedla analýzy charakteristik základních parametrů vzorku uhlí a vzorků uhlí s biomasou. Zde jsem zjistila, že obsah vody byl nejvyšší při 10% obsahu slámy ve vzorku uhlí. To znamená, že čím vyšší bude obsah biomasy, tím vyšší bude obsah vody ve vzorku. Naopak čím více bylo slámy ve vzorku, tím menší byl obsah popela. Uhlí jako takové má vyšší obsah popela než sláma. Avšak s vyšším obsahem slámy ve vzorku uhlí klesala hodnota spalného tepla a výhřevnosti. Vyšší obsah slámy snižuje výhřevnost paliva, což může být následek vyšší vlhkosti. V druhé řadě jsem provedla stanovení chemismu produktů po spálení vzorku uhlí a uhlí s biomasou.

Nejprve jsem porovnávala vzorky bez přídavku Nalco. Tedy při 10% obsahu slámy obsah oxidů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vzrostl. Naopak se snížil obsah  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{TiO}_2$ . Při úbytku slámy na 5% se ale obsah oxidů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  snížil a můžeme předpokládat stejný vývoj při dalším úbytku slámy. Při dalším úbytku slámy naopak obsah  $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{CaO}$  vzrůstal. Při přídavku 5% slámy došlo k nárůstu obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{TiO}_2$ .

U vzorků s přídavkem Nalco byla situace jiná. U 10% přídavku slámy do vzorku s přídavkem Nalco se obsah oxidů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{K}_2\text{O}$  zvýšil, zatímco u oxidů  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se naopak obsah snížil. Co se týče přídavku 5% slámy, došlo u původně zvýšených obsahů  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{K}_2\text{O}$  k opaku – poklesu obsahu těchto oxidů, nicméně byly stále vyšší než u čistého uhlí s přídavkem Nalco. Naopak tam, kde došlo původně k poklesu ( $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se při 5% přídavku slámy obsah opět zvýšil. Výjimkou byl  $\text{TiO}_2$ , jehož obsah měl stále se snižující tendenci.

Při výpočtech poměrů struskování a zanášení se jeví nejlepší kombinace pro nejnižší struskotvornost 90% uhlí, 10% slámy a přídavek Nalco. Hodnoty indexu základního poměru B/A a hodnoty poměru železa – vápníků jsou velmi nízké, tudíž předpoklad je nízká náchylnost ke struskování a tvorbě struskových nánosů. Avšak u

indexů struskování byly hodnoty vysoké, tudíž náchylnost ke tvorbě struskových nánosů je vysoká. U indexu TA, indexu popílkových nánosů a koeficientu zanášení byly hodnoty velmi vysoké, a proto náchylnost k zanášení a tvorbě popílkových nánosů bude velmi vysoká. Výpočet Teuneho čísla ukázal, že tavitelnost popela je těžká s teplotou nad 1400°C. Z ternárního diagramu jsem zjistila, že tavitelnost vzorků je okolo 1440°C.

## Seznam použité literatury

1. ENERGETIKA VÍTKOVICE, a.s. *Energetika Vítkovice: tradice, práce, perspektiva*. Ostrava, 2007.
2. Vítkovice. ČEZ, a.s. *Skupina ČEZ* [online]. 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/uhelne-elektrarny/cr/vitkovice.html>
3. LARSEN, John W. a Martin L. GORBATY. Coal Structure and Reactivity. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* [online]. 2014, č. 1 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105001125>
4. BRYERS, R. W. (1996). Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 22:29-120
5. THOMAS, Larry. *Coal geology*. Chichester, West Sussex, England: Wiley, 2002, ix, 384 p. ISBN 04-714-8531-4.
6. Jak uhlí vzniklo. OKD [online]. 2012 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/jak-uhli-vzniklo>
7. ROUBÍČEK, Václav. *Uhlí: Zdroje, procesy, užití*. Ostrava: Montanex, 2002, 173 s. ISBN 80-722-5063-9.
8. MORRIS, Neil. *Coal*. 1st ed. North Mankato, MN: Smart Apple Media, c2006, 32 p. ISBN 15-834-0628-X.
9. VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1997-1999, 2 sv. ISBN 80-707-8681-7.
10. PRONOBIS, M. Modernizacja kotłowni energetycznych. Modernization of steam generators. WNT Warszawa 2002:197–207. ; Z' elkowski J. Kohleverbrennung. Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. Coal combustion. Fuel, physics and theory. VGB B008. VGB Kraftwerkstechnik, Essen 1986;3:320–64
11. Slovník pojmů: Popílek. EBETON. *EBETON* [online]. 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/popilek>
12. MURTINGER, Karel. *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno: ERA, 2006, vi, 94 s. ISBN 80-736-6071-7.

13. OCHECOVÁ, Pavla. Popel z biomasy – významný zdroj živin. *Biom.cz* [online]. 2015, č. 1 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/popel-z-biomasy-vyznamny-zdroj-zivin>
14. GARCÍA, Roberto, Consuelo PIZARRO, Ana ÁLVAREZ, Antonio G. LAVÍN a Julio L. BUENO. Study of biomass combustion wastes. *Fuel* [online]. 2015, vol. 148, s. 152-159 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.079. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236115000939>
15. FANG, Xiang a Li JIA. Experimental study on ash fusion characteristics of biomass. *Bioresource Technology* [online]. 2012, vol. 104, s. 769-774 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.055. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096085241101666X>
16. WERTHER, J., M. SAENGER, E.-U. HARTGE, T. OGADA a Z. SIAGI. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2000, vol. 26, issue 1, s. 1-27 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/S0360-1285(99)00005-2. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128599000052>
17. BARTELS, Malte, Weigang LIN, John NIJENHUIS, Freek KAPTEIJN a J. Ruud VAN OMMEN. Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: Mechanisms, detection and prevention. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2008, vol. 34, issue 5, s. 633-666 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.04.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128508000208>
18. WU, Hao, Peter GLARBORG, Flemming Jappe FRANDSEN, Kim DAM-JOHANSEN a Peter Arendt JENSEN. Dust-Firing of Straw and Additives: Ash Chemistry and Deposition Behavior. *Energy* [online]. 2011-07-21, vol. 25, issue 7, s. 2862-2873 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1021/ef200452d. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef200452d>
19. HANSEN, P.F.B, K.H ANDERSEN, K WIECK-HANSEN, P OVERGAARD, I RASMUSSEN, F.J FRANDSEN, L.A HANSEN a K DAM-JOHANSEN. Co-firing straw and coal in a 150-MWe utility boiler: in situ measurements. *Fuel Processing Technology* [online]. 1998, vol. 54, 1-3, s. 207-225 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/S0378-3820(97)00070-2. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378382097000702>

20. STEENARI, B.-M., O. LINDQVIST, K. WIECK-HANSEN, P. OVERGAARD, I. RASMUSSEN, F.J. FRANDSEN, L.A. HANSEN a K. DAM-JOHANSEN. High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite: in situ measurements. *Biomass and Bioenergy* [online]. 1998, vol. 14, issue 1, s. 67-76 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/S0961-9534(97)00035-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953497000354>
21. MILES, Thomas R., Thomas R. MILES, Larry L. BAXTER, Richard W. BRYERS, Bryan M. JENKINS, Laurance L. ODEN, L.A. HANSEN a K. DAM-JOHANSEN. Boiler deposits from firing biomass fuels: in situ measurements. *Biomass and Bioenergy* [online]. 1996, vol. 10, 2-3, s. 125-138 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/0961-9534(95)00067-4. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0961953495000674>
22. JENKINS, B.M., R.R. BAKKER, J.B. WEI, Richard W. BRYERS, Bryan M. JENKINS, Laurance L. ODEN, L.A. HANSEN a K. DAM-JOHANSEN. On the properties of washed straw: in situ measurements. *Biomass and Bioenergy* [online]. 1996, vol. 10, issue 4, s. 177-200 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/0961-9534(95)00058-5. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0961953495000585>
23. MÍKA, Martin, Pavlína VOLÁKOVÁ, Břetislav KLÁPŠTĚ, Ondřej JANKOVSKÝ a Vladimír VERNER. Jak potlačit spékání biomasového popela?. *Biom.cz* [online]. 2011, č. 1 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/jak-potlacit-spekani-biomasoveho-popela>
24. WANG, Cuiping, Fengyin WANG, Qirong YANG a Ruiguang LIANG. Thermogravimetric studies of the behavior of wheat straw with added coal during combustion. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2009, vol. 33, issue 1, s. 50-56 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.04.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953408000986>
25. LI, Rundong, Xingping KAI, Tianhua YANG, Yang SUN, Yeguang HE a Shengqiang SHEN. Release and transformation of alkali metals during co-combustion of coal and sulfur-rich wheat straw. *Energy Conversion and Management* [online]. 2014, vol. 83, s. 197-202 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.02.059. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890414001782>

26. MANDØ, M., L. ROSENDAHL, C. YIN, H. SØRENSEN, Yeguang HE a Shengqiang SHEN. Pulverized straw combustion in a low-NO<sub>x</sub> multifuel burner: Modeling the transition from coal to straw. *Fuel* [online]. 2010, vol. 89, issue 10, s. 3051-3062 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.05.016. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236110002401>
27. WANG, Cuiping, Yajue WU, Qing LIU, Hairui YANG, Yeguang HE a Shengqiang SHEN. Study of the characteristics of the ashing process of straw/coal combustion: Modeling the transition from coal to straw. *Fuel* [online]. 2011, vol. 90, issue 9, s. 2939-2944 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.04.018. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236111002250>
28. DAI, Bai-Qian, Xiaojiang WU, Anthony DE GIROLAMO, Lian ZHANG, Yeguang HE a Shengqiang SHEN. Inhibition of lignite ash slagging and fouling upon the use of a silica-based additive in an industrial pulverised coal-fired boiler. Part 1. Changes on the properties of ash deposits along the furnace: Modeling the transition from coal to straw. *Fuel* [online]. 2015, vol. 139, issue 9, s. 720-732 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.06.054. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236114006206>
29. DAI, Bai-Qian, Xiaojiang WU, Anthony DE GIROLAMO, Lian ZHANG, Yeguang HE a Shengqiang SHEN. EXTERNAL DEPOSITS AND CORROSION IN BOILERS AND GAS TURBINES: Modeling the transition from coal to straw. *Journal of the American Society for Naval Engineers* [online]. 1959, vol. 71, issue 4, s. 599-602 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1959.tb01827.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1559-3584.1959.tb01827.x>
30. ELIOT, Robert C. *Boiler fuel additives for pollution reduction and energy saving*. Park Ridge, N.J.: Noyes Data Corp., 1978, x, 230 p. ISBN 08-155-0729-1.
31. *The Role of Fuel Additives to Control Environmental Emissions and ASH Fouling: Technical Coal Research: Technical Coal Research*. Luxembourg: Stationery Office Books, 1994. ISBN 978-0119738971.
32. EXTERNAL DEPOSITS AND CORROSION IN BOILERS AND GAS TURBINES. *Journal of the American Society for Naval Engineers* [online]. 1959, vol. 71, issue 4, s. 599-602 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1959.tb01827.x. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1559-3584.1959.tb01827.x>

33. WANG, Liang, Johan E. HUSTAD, Øyvind SKREIBERG, Geir SKJEVRAK a Morten GRØNLI. A Critical Review on Additives to Reduce Ash Related Operation Problems in Biomass Combustion Applications. *Energy Procedia* [online]. 2012, vol. 20, issue 4, s. 20-29 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.03.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610212007345>
34. KRAUSE, H.H., L.J. HILLENBRAND, A.E. WELLER a D.W. LOCKLIN. *Combustion Additives for Pollution Control— A State of the Art Review*. Columbus, Ohio: Batelle-Columbus Laboratories, 1977.
35. PRONOBIS, M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations (2005) *Biomass and Bioenergy*, 28 (4), pp. 375-383. Cited 64 times. Dostupné též z: <http://www.scopus.com /inward/record.url?eid=2-s2.0.13444311059&partnerID=40&md5=feadd92a6ec9f0bef3a1df5e448f57a7>
36. PARK, Sang-Woo a Cheol-Hyeon JANG. Characteristics of carbonized sludge for co-combustion in pulverized coal power plants. *Waste Management* [online]. 2011, vol. 31, issue 3, s. 523-529 [cit. 2015-04-21]. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X10005337>
37. NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*. 2. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002, 62 s. ISBN 80-248-0204-X.
38. NALCO® 8270 Fuel Treatment. *NALCO*. 2004, č. 1, s. 3.
39. ČEZ A.S. *Standardní pracovní postup*. Ostrava, 2012.
40. HASCHKE, Michael. *Laboratory micro-x-ray fluorescence spectroscopy: Instrumentation and Applications*. Switzerland: Springer International Publishing, 2014, 356 s. ISBN 978-331-9048-635.
41. PARK, Jin Hee, Mansour EDRAKI, David MULLIGAN a Hang Seok JANG. The application of coal combustion by-products in mine site rehabilitation. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2014, vol. 84, s. 761-772 [cit. 2015-04-23]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.049. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614000626>
42. MURTIGER, Karel. Možnosti využití biomasy. *Biom.cz* [online]. 2007, č. 1 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-biomasy>



43. SELVAKUMARAN, P., A. LAWERENCE a A.K. BAKTHAVATSALAM. Effect of additives on sintering of lignites during CFB combustion. Applied Thermal Engineering [online]. 2014, vol. 67, 1-2, s. 480-488 [cit. 2015-04-23]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.031. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431114002063>
44. WANG, Liang, Øyvind SKREIBERG a Michael BECIDAN. Investigation of additives for preventing ash fouling and sintering during barley straw combustion. Applied Thermal Engineering [online]. 2014, vol. 70, issue 2, s. 1262-1269 [cit. 2015-04-23]. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.075. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431114004517>
45. JIŘÍČEK, Ivo. Aditivace ke zlepšení termických vlastností slámy. Biom.cz [online]. 2013, č. 1 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/aditivace-ke-zlepseni-termickych-vlastnosti-slamy-2>
46. Slovník pojmů použitých na této webové stránce. COACH BIOENERGY (CBE). COACH BioEnergy (CBE) [online]. 2015 [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.coach-bioenergy.eu/cs/component/glossary/?id=553>

## Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: snímky skelné a skelně krystalické podoby .....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2: Teoretická analýza 11 vzorků .....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 3: Vzorkovnice se vzorky .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 4: Navážka vzorku pro stanovení obsahu hrubé vody .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 5: Vibrační mlýn .....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 6: Součásti vibračního mlýnu .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 7: Sušárna se vzorky .....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 8: Exsikátor .....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 9: Kalorimetr .....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 10: Kalorimetrická bomba .....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 11: Muflová pec .....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 12: Popel .....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 13: ternární diagram .....</i>	<i>57</i>

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Srovnání základních stanovení uhlí a slámy</i>	20
<i>Tabulka 2: Výsledky zákl. stanovení při spoluspalování pšeničné slámy a uhlí</i>	21
<i>Tabulka 3: Základní poměr B/A</i>	29
<i>Tabulka 4: Poměr železa - vápníku</i>	30
<i>Tabulka 5: Index Rs</i>	30
<i>Tabulka 6: Zásady celkem</i>	30
<i>Tabulka 7: Index Rp</i>	31
<i>Tabulka 8: Koeficient zanášení</i>	31
<i>Tabulka 9: Teuneho číslo</i>	32
<i>Tabulka 10: Vzorky základního stanovení</i>	43
<i>Tabulka 11: Vzorky základního stanovení uhlí a biomasy</i>	46
<i>Tabulka 12: vzorek č.1 - hrubá voda, anal. voda, celková voda</i>	46
<i>Tabulka 13: vzorek č.1 - popel, spalné teplo, výhřevnost</i>	47
<i>Tabulka 14: vzorek č.2 - hrubá voda, anal. voda, celková voda</i>	48
<i>Tabulka 15: vzorek č.2 - popel, spalné teplo, výhřevnost</i>	48
<i>Tabulka 16: vzorek č.3 - hrubá voda, anal. voda, celková voda</i>	49
<i>Tabulka 17: vzorek č. 3 - popel, spalné teplo, výhřevnost</i>	49
<i>Tabulka 18: srovnání zákl. analýz jednotlivých vzorků</i>	51
<i>Tabulka 19: Výsledky chemismu popela</i>	53
<i>Tabulka 20: Indexy</i>	55